



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN,
ESPECIALIDAD EN SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

**“COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS
MEDIANTE PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES
Y COMPUTACIONALES EN LA CARACTERIZACIÓN
ACÚSTICA DE RECINTOS”**

Laura Ruiz Domínguez
Tutor: Ricardo San Martín Murugarren
Pamplona, 24/042015



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.2 PLAN DE DESARROLLO	2
1.3 CONTENIDO DEL CD	3
2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA	4
2.1 ELEMENTOS QUE CONDICIONAN EL SONIDO DENTRO DE UN RECINTO ...	4
2.1.1 PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN UN RECINTO CERRADO	4
2.1.2 SONIDO REFLEJADO	5
2.1.3 PERCEPCIÓN SUBJETIVA PRIMERAS REFLEXIONES. ECOS	6
2.1.4 ECO FLOTANTE	7
2.1.5 MODOS PROPIOS DE UNA SALA	7
2.1.6 BALANCE ENERGÉTICO SONORO	9
2.1.7 NIVEL DE PRESIÓN SONORA	10
2.2 TEORÍA ACÚSTICA	11
2.2.1 Acústica Geométrica	11
2.2.2 Acústica Estadística	13
2.2.3 Acústica Ondulatoria	14
2.3 MATERIALES Y ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE RECINTOS	14
2.4 LA RESPUESTA AL IMPULSO	17
2.5 CURVA DE DECRECIMIENTO	21
2.6 PARÁMETROS ACÚSTICOS PARA LA EVALUACIÓN ACÚSTICA DE SALAS	22
2.6.1 CRITERIO TEMPORAL	22
2.6.1.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN (T)	22
2.6.1.2 EARLY DECAY TIME (EDT)	25
2.6.1.3 CALIDEZ (Bass Ratio, BR) Y BRILLO (Br)	26
2.6.2 CRITERIO ENERGÉTICO	28
2.6.2.1 CLARIDAD DE LA VOZ (C_{50})	28
2.6.2.2 CLARIDAD MUSICAL (C_{80})	29
2.6.2.3 DEFINICIÓN (D)	30
2.6.3 FUERZA ACÚSTICA O SONORIDAD, G	31
2.6.4 PARÁMETROS LATERALES	32
2.6.4.1 EFICIENCIA LATERAL (J_{LF})	32
2.6.4.2 J_{LFC}	33
2.6.5 PARÁMETROS BINAURALES	33
2.6.5.1 CORRELACIÓN CRUZADA INTERAURAL (IACC)	33
2.6.6 ÍNDICES DE INTELIGIBILIDAD	33
2.6.6.1 STI	34
2.6.6.2 RASTI	35
2.7 DIFERENCIAS EN LOS PARÁMETROS MEDIDOS Y SIMULADOS	36
2.7.1 JUST NOTICEABLE DIFFERENCE (JND)	36
2.7.2 ESTIMACIÓN ERROR EXPERIMENTAL	36
2.7.2.1 ERROR ABSOLUTO	37



2.7.2.2	ERROR RELATIVO	37
2.7.2.3	ERROR PORCENTUAL	37
3.	PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES. NORMATIVA VIGENTE PARA LA MEDIDA LA RESPUESTA DE IMPULSO	38
3.1	ESTADO DE OCUPACIÓN	38
3.2	CONDICIONES DE MEDICIÓN	38
3.3	PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN	39
4.	ODEON ROOM ACOUSTICS COMO SOFTWARE PARA LA SIMULACIÓN ACÚSTICA	40
4.1	QUÉ ES ODEON ROOM ACOUSTICS PROGRAM	40
4.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS FUNCIONES UTILIZADAS, PROCEDIMIENTO Y MÉTODOS DE CÁLCULO	41
5.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS AUDITORIOS ANALIZADOS	53
5.1	INTRODUCCIÓN	53
5.1.1	RECINTOS ESTUDIADOS	53
5.1.2	METODOLOGÍA ANÁLISIS ACÚSTICO	54
5.1.3	MATERIALES ASIGNADOS	57
5.2	ANÁLISIS INDIVIDUAL: FICHAS	59
5.2.1	SALA SINFÓNICA - AUDITORIO NACIONAL DE MÚSICA - MADRID	60
5.2.2	GRAN TEATRE DEL LICEU - BARCELONA	63
5.2.3	AUDITORIO - PALACIO EUSKALDUNA DE CONGRESOS Y DE LA MÚSICA - BILBAO	66
5.2.4	SALA PRINCIPAL - AUDITORIO-PALACIO DE CONGRESOS PRÍNCIPE FELIPE - OVIEDO	69
5.2.5	SALA MOZART - AUDITORIO - PALACIO DE CONGRESOS - ZARAGOZA.....	72
5.2.6	AUDITORIO - CENTRO KURSAAL - SAN SEBASTIÁN	79
5.2.7	SALA SINFÓNICA - AUDITORIO ALFREDO KRAUS - LAS PALMAS DE GRAN CANARIA	82
5.2.8	SALA PRINCIPAL - BALUARTE. PALACIO DE CONGRESOS Y AUDIT. DE NAVARRA - PAMPLONA	85
5.2.9	AUDITORIO MANUEL DE FALLA - GRANADA	89
5.2.10	GRAN TEATRO FALLA - CÁDIZ	94
5.2.11	TEATRO ROMEO - MURCIA	99
5.2.12	TEATRO VILLAMARTA - JEREZ DE LA FRONTERA	102
5.2.13	SALA PRINCIPAL. AUDITORIO CIUDAD DE LEÓN - LEÓN	107
5.2.14	TEATRO GAYARRE - PAMPLONA	110
5.2.15	TEATRO MIGUEL DE CERVANTES - MÁLAGA	114
5.2.16	SALA BUERO VALLEJO - GUADALAJARA	119
6.	ANÁLISIS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS	122
6.1	PARÁMETROS GEOMÉTRICOS SEGÚN EL TIPO DE SALA	129
7.	ANÁLISIS ACÚSTICO COMPARATIVO Y EXPOSICIÓN DE DATOS	132
7.1	TABLAS GLOBALES COMPARATIVAS PARÁMETROS ACÚSTICOS	132
7.1.1	Tiempo de Reverberación (T_{mid})	132
7.1.2	Calidez (BR)	135
7.1.3	Brillo (br)	135



7.1.4	Tiempo de caída inicial (EDT_{mid})	139
7.1.5	Claridad de la voz (C_{50})	142
7.1.6	Claridad musical (C_{80})	144
7.1.7	Eficiencia lateral J_{LF}	146
7.1.8	J_{LFC}	147
7.1.9	RASTI	148
7.2	CÁLCULO JUST NOTICEABLE DIFFERENCE (JND) Y CÁLCULO DE ERRORES ..	149
7.2.1	CÁLCULO DE ERRORES: ERROR ABSOLUTO, ERROR RELATIVO Y ERROR PORCENTUAL	149
7.2.2	JUST NOTICEABLE DIFFERENCE (JND): ANÁLISIS GENERAL	152
7.2.3	JUST NOTICEABLE DIFFERENCE (JND): ANÁLISIS POR FRECUENCIAS	158
8.	CONCLUSIONES	162
9.	BIBLIOGRAFÍA	165



1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

Los parámetros acústicos descritos en la Norma ISO 3382 sirven como referencia para la caracterización acústica de recintos destinados tanto a la transmisión de lenguaje oral como musical. Pueden ser derivados a partir de respuestas al impulso medidas o simuladas, teniendo ambas estrategias sus ventajas e inconvenientes. En una sala ya construida, conocer los valores medidos de los parámetros acústicos parece indispensable de cara a realizar una evaluación objetiva del recinto bajo las condiciones existentes. Por otro lado, es evidente que para un análisis espacial muy detallado – por ejemplo, en cada butaca de las zonas de audiencia – la simulación es una herramienta inestimable, cuando no imprescindible, que nos permite evaluar resultados en un tiempo razonable.

Pese a todo, el principal factor a tener en cuenta a la hora de evaluar la calidad de un programa de simulación es la concordancia de los resultados obtenidos con los medidos ‘in situ’. De hecho, con el propósito de descubrir las fuentes de error más comunes para que los desarrolladores de software pudieran corregirlas en futuras versiones, se desarrolló una serie de estudios, denominados Round Robin que comparaban, bajo condiciones controladas en un conjunto pequeño de posiciones fuente-receptor, valores medidos y simulados en distintas salas. En este PFC se pretende profundizar en la habitual comparación entre valores medidos y simulados de parámetros acústicos mediante una confrontación de varios auditorios de gran tamaño en los que las medidas y las simulaciones han sido realizadas por equipos diferentes.

El objetivo principal del PFC es analizar el grado de ajuste en los modelos computacionales de recintos mediante la comparación entre valores medidos y simulados de los parámetros acústicos en auditorios de gran tamaño. Para ello se han elegido dieciséis auditorios y teatros españoles con un número de localidades de mil o superior. Suponen el 21% del total de los recintos cubiertos con estas características.

Hemos realizado un análisis geométrico y un análisis acústico. Primero, se ha evaluado la representatividad de estas dieciséis salas, comparando sus dimensiones geométricas con la recopilación de auditorios internacionales que hace Beranek. También se han estudiado los parámetros geométricos en función del tipo de recinto, teatro o auditorio, analizando las diferencias.

A continuación, la simulación acústica se ha llevado a cabo con el programa de simulación acústica “Odeon room acoustics software”. Se han realizado simulaciones en todos los auditorios y se han recopilado datos de procedimientos de medida en los mismos realizados por otros grupos de investigación para su posterior comparación.

Se han determinado otros parámetros acústicos a parte del tiempo de reverberación (tanto monoaurales: EDT, T_{30} , G, C_{80} , D_{50} , T_s , ST, como laterales J_{LF} , e índices de inteligibilidad STI y RASTI) que permiten evaluar con mayor precisión las condiciones acústicas de las salas.



En el proceso de simulación, se han considerado diferentes posiciones de los oyentes, mediante la recreación de los diferentes procedimientos de medida encontrados.

Mediante la confrontación de los datos recopilados con ambas estrategias, medida y simulación, se ha evaluado el grado de similitud entre los datos medidos y simulados y el grado de precisión del software de simulación, sin tener la posibilidad de ajuste previo, partiendo desde la fase de diseño en la que los materiales, dependiendo de las características técnicas o mediante planos o fotografías han sido asignados previamente.

1.2 PLAN DE DESARROLLO

- ESTUDIO DE LA BIBLIOGRAFÍA EXISTENTE

Se ha llevado a cabo una recopilación y lectura de información (ISO 3382, Manual ODEON, PFC's Laboratorio de Acústica, publicaciones y bibliografía de la sociedad española de acústica...).

Una vez ha sido recopilada toda la información se ha hecho un estudio más exhaustivo profundizando en toda la bibliografía.

También se ha analizado los procesos de medida de los datos obtenidos por otros grupos facilitados por el departamento de física de la Universidad Pública de Navarra y por otros ingenieros acústicos que hemos encontrado en el proceso de búsqueda.

- SIMULACIÓN ACÚSTICA DE LAS SALAS

Con el modelo geométrico de las salas, se ha realizado una simulación con el software de simulación acústica ODEON en las mismas condiciones que en los diferentes procedimientos de medida encontrados, ya sea el número y posición de los receptores y de la fuente, materiales y propiedades de estos, mediciones con concha o sin concha acústica y demás características disponibles. También se han ajustado todos los demás parámetros que limitan las condiciones de simulación, como el número de rayos y la longitud de respuesta impulsiva de la sala.

- DESCRIPCIÓN GENERAL RECINTO

Con los parámetros acústicos encontrados obtenidos a partir de procesos experimentales se ha hecho una descripción detallada de cada auditorio, incluyéndose el proceso de medida y simulación acústica, características generales, capacidad, volumen, valores de los parámetros acústicos y planos.

- ANÁLISIS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

Evaluación de las características técnicas de las salas estudiadas mediante una comparación de sus relaciones geométricas con algunas salas de la recopilación de Auditorios y Teatros internacionales realizada por Beranek.

- ANÁLISIS ACÚSTICO COMPARATIVO Y EXPOSICIÓN DE DATOS

Cuantificación de la percepción acústica de las diferencias obtenidas entre las simulaciones y las mediciones experimentales mediante el índice jnd, asimismo, cálculo de errores y visualización de los diferentes datos mediante gráficas y tablas.



- **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

Análisis del proceso global utilizado. Estudio de las posibles fuentes de error de los diferentes métodos, mediciones experimentales y simulación acústica y por último, evaluación del grado de precisión del software de simulación sin tener la posibilidad de ajuste previo.

1.3 CONTENIDO DEL CD

En el CD se encuentran todos los datos utilizados en la elaboración de este proyecto en lugar de incluirlos en un Apéndice. A continuación se especifica los nombres de las carpetas contenedoras y su contenido:

- Anexo I_Valores Experimentales: Documentos y publicaciones en las que se encuentran los valores de los parámetros acústicos obtenidos mediante procesos experimentales 'in situ'.
- Anexo II_Resultados ODEON: Se recogen los valores de los parámetros acústicos exportados desde Odeon "002_A Nacional de musica_resultados.txt, 003_Teatre Liceu_resultados salavacia.txt...".

2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

2.1 ELEMENTOS QUE CONDICIONAN EL SONIDO DENTRO DE UN RECINTO

2.1.1 PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN UN RECINTO CERRADO

La energía radiada por una fuente sonora en un recinto cerrado llega a un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo de dos formas diferentes: una parte de la energía llega de forma directa (sonido directo), es decir, como si fuente y receptor estuviesen en el espacio libre, mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta (sonido reflejado), al ir asociada a las sucesivas reflexiones que sufre la onda sonora cuando incide sobre las diferentes superficies del recinto.

La energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora, mientras que la energía asociada a cada reflexión depende de los siguientes factores:

- Camino recorrido por el rayo sonoro
- Grado de absorción de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies implicadas.

Cuanto mayor sea la distancia recorrida y más absorbentes sean los materiales empleados, menor será la energía asociada tanto al sonido directo como a las sucesivas reflexiones.

En la Fig. 1 podemos ver en línea discontinua la llegada del sonido directo al receptor cuya energía sólo depende de la distancia de la fuente a éste. Y en línea continua la llegada del sonido reflejado.

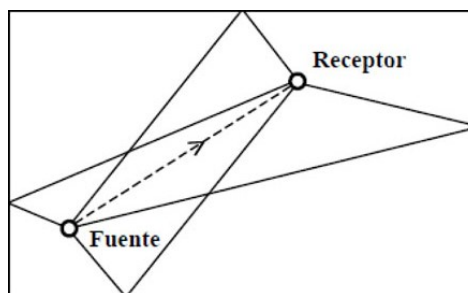


Fig. 1 Sonido directo y primeras reflexiones

2.1.2 SONIDO REFLEJADO

Se llama sonido reflejado al fenómeno asociado a las sucesivas reflexiones que sufre una onda sonora cuando incide sobre diferentes superficies de un recinto. Es decir, cuando la onda encuentra un obstáculo que no puede traspasar ni rodear.

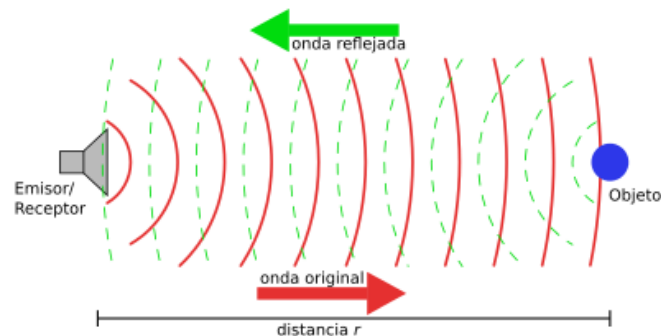


Fig. 2 Fenómeno de la reflexión

Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto objeto de estudio, se observan básicamente dos zonas de características notablemente diferenciadas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas (“early reflections”), y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante.

- PRIMERAS REFLEXIONES

En general las primeras reflexiones presentan un valor energético mayor que la cola reverberante o reflexiones tardías.

Estas reflexiones, como dependen directamente de la geometría del recinto, son específicas en cada punto, y por tanto, determinan las características acústicas propias de él mismo, juntamente con el sonido directo.

Son aquellas que llegan inmediatamente después del sonido directo. Habitualmente de orden $n \leq 3$. Se habla de orden “n” cuando el rayo sonoro asociado ha incidido “n” veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor. Se suele establecer un límite temporal para la zona de primeras reflexiones de aproximadamente 100 ms desde la llegada del sonido directo, aunque dicho valor varía en cada caso concreto en función de la forma y del volumen del recinto.

- REFLEXIONES TARDÍAS

También llamadas cola reverberante, estas reflexiones generalmente son de orden superior a 3. La densidad es mayor que las primeras al haberse dispersado al chocar con las superficies. El nivel sonoro es menor ya que con el recorrido del sonido y junto a la absorción de las superficies este es atenuado.

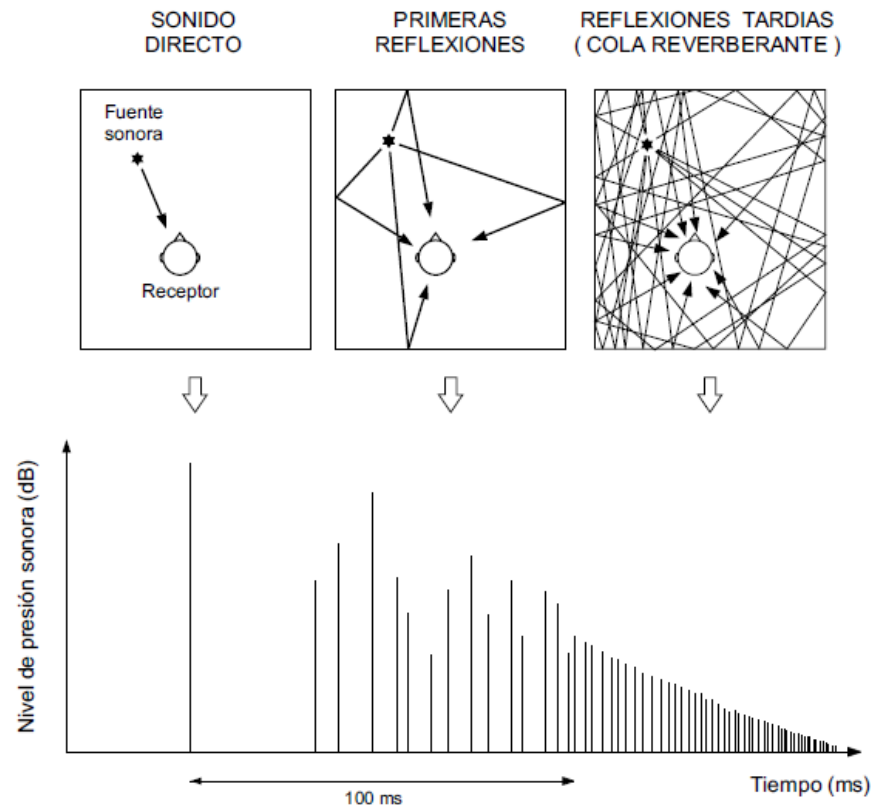


Fig. 3 Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido directo, primeras reflexiones y reflexiones tardías

La representación gráfica temporal de la llegada de las diversas reflexiones, acompañadas de su nivel energético correspondiente, se denomina ecograma o reflectograma que podemos observar en la Fig. 3.

2.1.3 PERCEPCIÓN SUBJETIVA PRIMERAS REFLEXIONES. ECOS

El eco es un fenómeno consistente en escuchar un sonido después de haberse extinguido la sensación producida por la onda sonora. Se produce eco cuando la onda sonora se refleja perpendicularmente en una pared.

Todas aquellas reflexiones que llegan a un oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo son integradas por el oído humano y, en consecuencia, su percepción no es diferenciada respecto al sonido directo. Esto es bueno a la hora de transmitir un mensaje oral ya que eleva su inteligibilidad y las reflexiones aumentan la sensación de sonoridad.

Por el contrario, la aparición en un punto de escucha de una reflexión de nivel elevado con un retardo superior a los 50 ms es totalmente contraproducente para la obtención de una buena inteligibilidad de la palabra, ya que es percibida como una repetición del sonido directo.

En tal caso, dicha reflexión se denomina eco. El retardo de 50 ms equivale a una diferencia de caminos entre el sonido directo y la reflexión de, aproximadamente, 17 m.

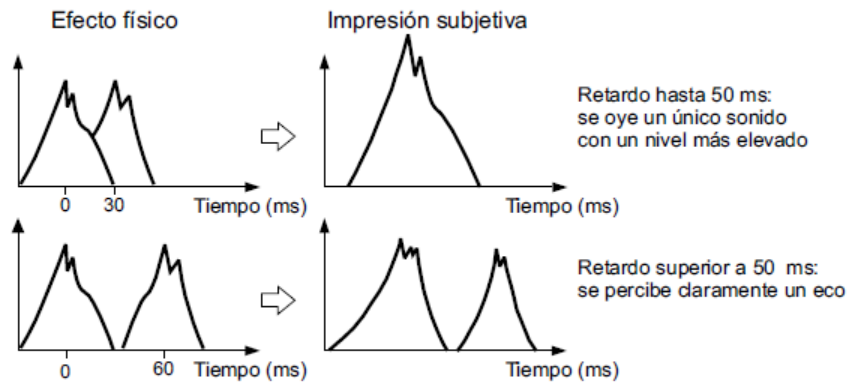


Fig. 4 Superposición de sonidos con diferentes retardos e impresión subjetiva asociada.

2.1.4 ECO FLOTANTE

El eco flotante (“flutter echo”) consiste en una repetición múltiple, en un breve intervalo de tiempo, de un sonido generado por una fuente sonora, y aparece cuando ésta se sitúa entre dos superficies paralelas, lisas y muy reflectantes.

Produce la recepción del sonido en tiempos iguales interfiriendo con la legitimidad del sonido directo. Nuestro cerebro interpreta estas rápidas y continuas frecuencias como un tono particular. Los problemas más comunes por éste fenómeno son la pérdida de imagen estéreo del sonido, fatiga auditiva, sonido metálico y sonido opacado por mucha reverberación.

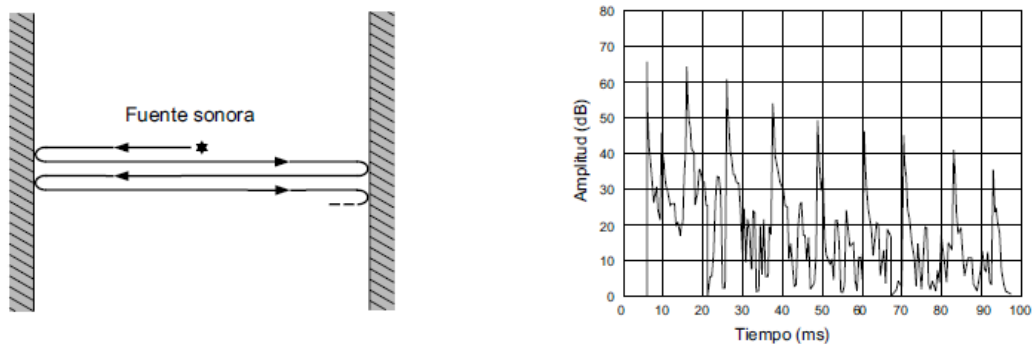


Fig. 5 Eco flotante originado por dos superficies paralelas y curva ETC para un eco flotante.

2.1.5 MODOS PROPIOS DE UNA SALA

La combinación de ondas incidentes y reflejadas en una sala da lugar a interferencias constructivas y destructivas o, lo que es lo mismo, a la aparición de las denominadas ondas estacionarias o modos propios de la sala. Cada modo propio va asociado a una frecuencia, igualmente denominada propia, y está caracterizado por un nivel de presión sonora SPL que varía en función del punto considerado.

El número de modos propios es ilimitado, si bien su distribución a lo largo del eje frecuencial es discreta, aumentando su densidad con la frecuencia. La presencia de todos

ellos provoca en cada punto una concentración de energía alrededor de las diversas frecuencias propias, lo cual confiere un sonido característico a cada sala. Dicho sonido recibe el nombre de “coloración” y normalmente se pone de manifiesto en espacios de dimensiones reducidas, por ejemplo, los estudios de grabación.

Únicamente cuando se trata de recintos de forma paralelepípedica con superficies totalmente reflectantes es posible calcularlos de una forma muy sencilla, mediante la denominada fórmula de Rayleigh:

$$f_{k,m,n} = 172,5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}$$

Donde:

L_x , L_y y L_z representan las dimensiones de la sala en metros.

k , m , n pueden tomar cualquier valor entero (0,1,2,3...).

Cada combinación de valores k , m , n da lugar a una frecuencia y modo propio asociado, que recibe el nombre de modo propio k , m , n . Por ejemplo, la combinación:

$k = 2$, $m = 1$, $n = 1$ da lugar al modo propio 2, 1, 1.

Por otra parte, y como se ha mencionado anteriormente, la densidad de modos propios aumenta con la frecuencia. Ello significa que, a partir de una cierta frecuencia, el concepto de coloración del sonido deja de tener sentido, ya que una gran densidad de modos propios es equivalente a la ausencia de éstos, por el hecho de que dejan de existir concentraciones discretas de energía.

La fórmula empírica que permite calcular, para cada sala, la frecuencia límite superior a partir de la cual los modos propios tienen una influencia prácticamente nula, es la siguiente:

$$f_{max} = 1849 \sqrt{\frac{T_{mid}}{V}}$$

Donde:

T_{mid} es el valor del tiempo de reverberación.

V es el volumen de la sala expresado en m^3 .

En el caso de recintos grandes, como teatros y salas de conciertos, la coloración del sonido a causa de los modos propios es prácticamente nula y, por tanto, no se tiene en cuenta en la fase de diseño [1].

Según la trayectoria que siguen los frentes de ondas, se pueden clasificar los modos propios de vibración de un recinto rectangular en tres grupos:

- **Modos axiales:** Aquel formado como resultado de una onda estacionaria fluctuante entre dos superficies ($n_x, 0, 0$), ($0, n_y, 0$) y ($0, 0, n_z$).

- **Modos tangenciales:** Aquel formado como resultado de la reflexión de una onda estacionaria entre cuatro superficies $(n_x, n_y, 0)$, $(n_x, 0, n_z)$ y $(0, n_y, n_z)$.
- **Modos oblicuos:** Los modos oblicuos se forman por la relación de seis o más superficies de la sala. Cuando la distancia de separación de trazado formada por seis o más superficies de la sala coincide con la longitud de onda de una frecuencia, se forma una onda estacionaria oblicua (n_x, n_y, n_z) .

2.1.6 BALANCE ENERGÉTICO SONORO

Cuando una fuente sonora radia energía de forma continua, una vez transcurrido un periodo de tiempo transitorio, se alcanza un estado de equilibrio caracterizado por el hecho de que la absorción acústica producida por las superficies del recinto se iguala con el aporte energético de la fuente.

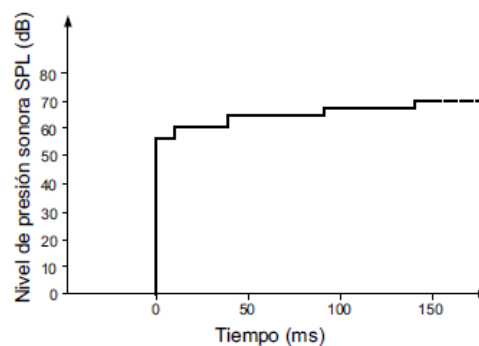


Fig. 6 Aumento del nivel de presión sonora SPL en un punto receptor por la acumulación del sonido directo y de las sucesivas reflexiones

El aporte constante de energía por parte de la fuente sonora hace que la energía total recibida en cualquier punto de la sala, obtenida como suma de la directa y la indirecta o reflejada, vaya aumentando progresivamente hasta alcanzar el mencionado punto de equilibrio.

En la Fig. 6 se observa el incremento del nivel de presión sonora en un punto receptor genérico hasta llegar a un valor máximo correspondiente al régimen permanente.

El proceso es reversible de tal manera que en cuanto la fuente sonora se detiene bruscamente, el nivel de presión sonora empieza a disminuir progresivamente hasta desaparecer o confundirse con el ruido de fondo de la sala.

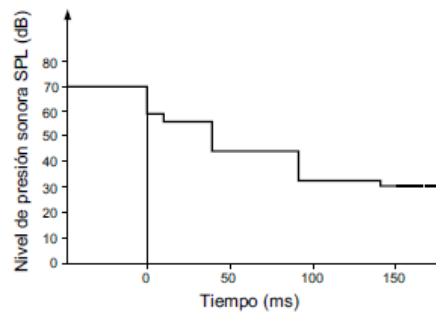


Fig. 7 Disminución del nivel de presión sonora en un punto receptor después de que la fuente sonora se haya detenido

En la Fig. 7 se observa la desaparición primero del sonido directo y posteriormente la desaparición de las sucesivas reflexiones.

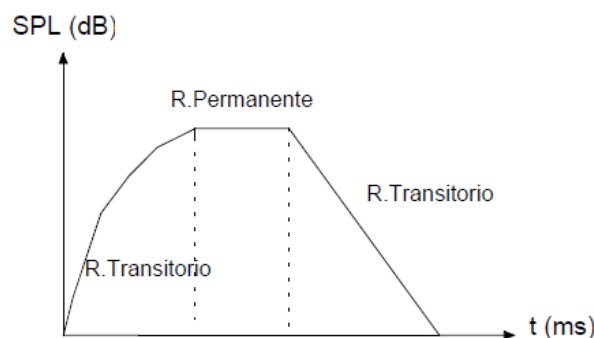


Fig. 8 Balance Energético Sonoro en el interior de un recinto en escala semi-logarítmica

Durante el primer transitorio, la energía sonora presente en la sala empieza a aumentar progresivamente, debido al aporte directo de la fuente y de las reflexiones. Se alcanza el régimen permanente cuando se iguala la absorción de la sala con la energía procedente de la fuente, permaneciendo en él hasta que se apaga la fuente.

En el segundo transitorio, la energía sonora decae primero, al desaparecer el sonido.

La rapidez en la atenuación del sonido depende del grado de absorción de las superficies del recinto: a mayor absorción, atenuación más rápida. El grado de permanencia del sonido una vez que la fuente sonora se ha desconectado se denomina reverberación. Por lo tanto, la reverberación de una sala es mayor cuanto más tarda el sonido en atenuarse, es decir, cuanto menos absorbente es el recinto.

2.1.7 NIVEL DE PRESIÓN SONORA

Habitualmente no se trabaja en términos de energía, sino de nivel de presión sonora SPL, lo cual es totalmente equivalente.

Por lo tanto, la presión sonora total en un punto cualquiera de un recinto se obtiene a partir de la contribución de las presiones del sonido directo (disminuye con la distancia a la fuente) y del sonido reflejado (se mantiene constante).



La zona donde predomina el sonido directo se denomina zona de campo directo. A dicha zona pertenecen los puntos más próximos a la fuente sonora y en ella el nivel de presión sonora, llamado nivel de campo directo L_D , disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Es como si el receptor estuviese situado en el espacio libre.

La zona donde predomina el sonido reflejado recibe el nombre de zona de campo reverberante.

En esta zona, el nivel de presión sonora, denominado nivel de campo reverberante L_R , se mantiene constante.

La distancia para la cual $L_D = L_R$ se denomina distancia crítica D_c . Se puede demostrar que:

$$D_c = 0,14 \sqrt{QR}$$

Donde:

Q = Factor de directividad de la fuente sonora en una dirección determinada.

R = Constante de la sala en m^2 . Donde S_t es la superficie total de la sala en m^2 y α es el coeficiente medio de absorción de la sala.

$$\frac{S_t \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

2.2 TEORÍA ACÚSTICA

Existen tres teorías denominadas teoría geométrica, teoría estadística y teoría ondulatoria, éstas, constituyen las tres teorías clásicas que hacen posible conocer con rigor el comportamiento del sonido en el interior de un recinto cualquiera.

2.2.1 ACÚSTICA GEOMÉTRICA

La hipótesis elemental de partida de la teoría geométrica consiste en tratar los rayos sonoros como si se tratase de rayos de luz, es decir, considerando que las reflexiones de los mismos sobre las distintas superficies son totalmente especulares y que, por tanto, verifican la ley de la reflexión.

Aplica las leyes de la óptica geométrica para deducir la dirección de propagación tras cada incidencia en las diferentes superficies del recinto y se ayuda de los coeficientes de absorción de cada material para calcular la energía perdida en cada reflexión.

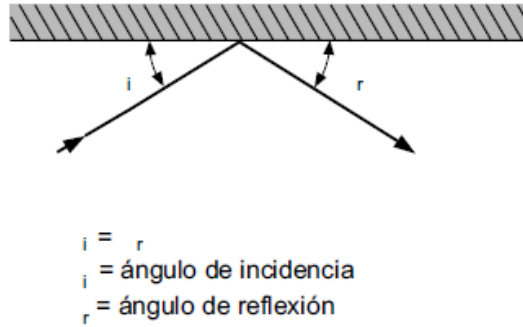


Fig. 9 Reflexión especular del sonido sobre una superficie

Las leyes de la óptica geométrica son las siguientes:

- Ley de la reflexión de la luz. Ley de Snell

Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie reflejante plana el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. En la Imagen 10, $\alpha = \beta$, y los dos rayos permanecen en el mismo plano.

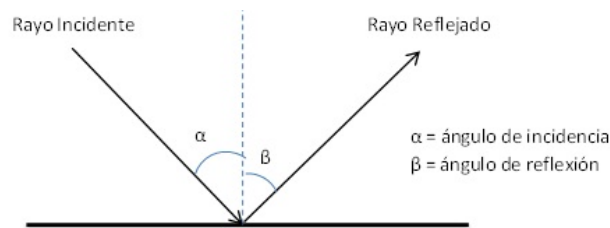


Fig. 10 Reflexión de la luz

Este análisis, es una aproximación de la realidad ya que sólo en determinadas situaciones se da una verdadera reflexión especular y es necesario que se cumplan los siguientes requisitos:

- Dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda del sonido. En el caso de que las dimensiones sean menores o similares a la longitud de onda del sonido, la onda sonora rodea la superficie y sigue propagándose como si el obstáculo que representa la misma no existiese. Dicho fenómeno se conoce con el nombre de difracción.
- Superficie lisa y muy reflectante. Si una superficie presenta rugosidades, la reflexión ya no es especular, sino difusa, los rayos reflejados van en distintas direcciones debido a la rugosidad de la superficie. En el caso de que haya reflexión especular, los rayos reflejados tienen todos la misma dirección.

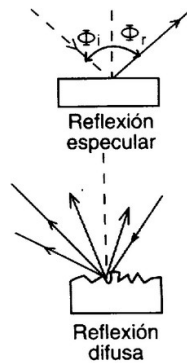


Fig. 11 Reflexión especular del sonido sobre una superficie y reflexión difusa

Con esta teoría podemos estudiar el sonido directo, primeras reflexiones explicadas anteriormente. Es solamente válida para medias y altas frecuencias ya que las bajas frecuencias se comportan de manera totalmente diferente.

El programa de simulación utilizado, ODEON, hace uso de esta teoría para la aproximación del campo sonoro real.

2.2.2 ACÚSTICA ESTADÍSTICA

Estudia el comportamiento de la energía acústica en la sala desde una visión estacionaria. Esto es, cuando la fuente sonora comienza a emitir energía acústica en el interior del recinto, los rayos empiezan a propagarse libremente, transcurrido un tiempo que depende de la distancia de la fuente a las superficies del recinto, los rayos sonoros chocan y se producen reflexiones. La energía que se genera en la sala se va absorbiendo por las superficies y la absorción del medio. Cuando el conjunto absorbe la misma energía por unidad de tiempo que la emitida por la fuente, se llega a una situación estacionaria y a partir de ese momento la densidad de energía media que hay en la sala permanece constante.

Parte de la suposición de un campo sonoro uniforme en la sala. El estudio de la cola reverberante se realiza siguiendo la teoría estadística y por lo tanto el estudio del tiempo de reverberación. Para calcular el tiempo de reverberación se emplean principalmente las fórmulas de Sabine, Eyring o Arau-Puchades.

Todas las expresiones para el cálculo del tiempo de reverberación consideran condiciones de campo difuso que se basa en los siguientes supuestos:

- La fuente sonora emite en todas las direcciones.
- Las ondas reflejadas se propagan en todas las direcciones con igual probabilidad.
- La densidad de la energía sonora en un instante de tiempo determinado es la misma en cualquier posición de la sala.

- La energía sonora en un punto se obtiene mediante la suma de las medias de todas las reflexiones que llegan a dicho punto, sin tener en cuenta las fases.

Es sólo una aproximación de la realidad ya que las reflexiones se distribuyen de manera no uniforme debido a los materiales, dimensiones, y formas de la sala. Se deben considerar las fases de las señales y las fuentes sonoras son un poco directivas.

2.2.3 ACÚSTICA ONDULATORIA

Contempla el fenómeno ondulatorio del sonido. Gracias a esta teoría se podrá estudiar la influencia del dimensionado y las proporciones del recinto en su calidad acústica.

El estudio analítico de los modos propios, anteriormente ya descritos en el apartado 2.1.5 de la introducción teórica, se realiza a través de la denominada acústica ondulatoria. Ya que éstos son la solución a la ecuación de ondas y ocurren a una frecuencia de resonancia o frecuencia propia.

2.3 MATERIALES Y ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE RECINTOS

El éxito en el diseño acústico de cualquier tipo de recinto, una vez fijado su volumen y definidas sus formas, radica en primer lugar en la elección de los materiales más adecuados para utilizar como revestimientos del mismo, con objeto de obtener unos tiempos de reverberación óptimos.

Además, en según qué tipo de espacios, resulta necesario potenciar la aparición de primeras reflexiones (es el caso de teatros y salas de conciertos) y/o conseguir una buena difusión del sonido (exclusivamente en el caso de salas de conciertos).

Estos son los efectos que conseguiremos según qué tipo de materiales utilicemos:

- Absorción del sonido: La energía reflejada es la mínima.
- Reflexión del sonido: La energía reflejada es mucho mayor y está concentrada alrededor de la dirección de reflexión especular.
- Difusión del sonido: La energía reflejada es elevada y está repartida de forma uniforme en todas las direcciones de reflexión.

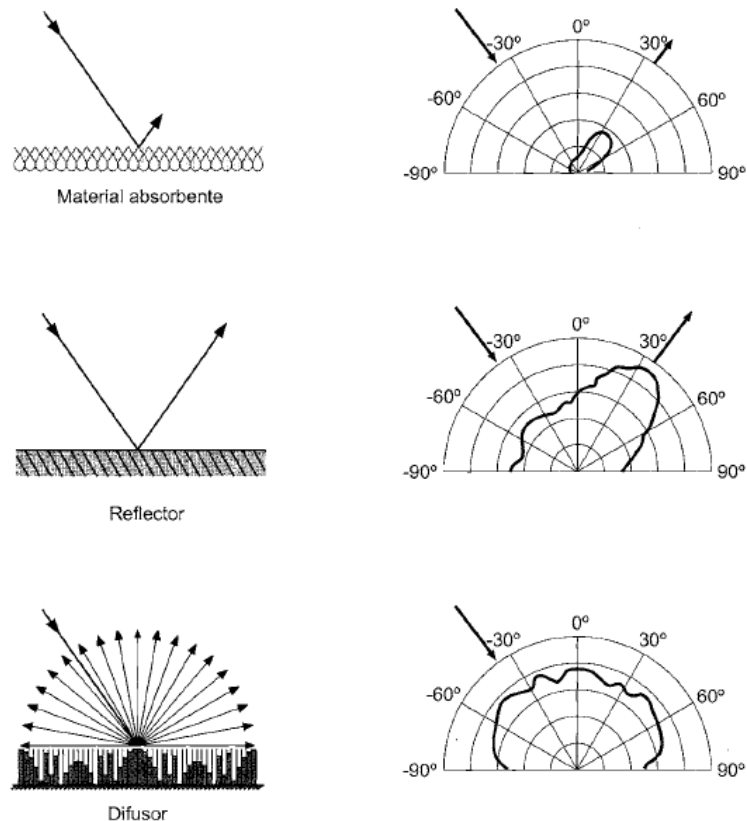


Fig. 12 Efectos absorción, reflexión especular y difusión del sonido

• ABSORCIÓN DEL SONIDO

Para la calidad acústica de un recinto, es determinante la reducción de la energía asociada a las ondas sonoras, tanto en su propagación a través del aire, como cuando inciden sobre las superficies límite.

Cuando una onda sonora alcanza una superficie, la mayor parte de su energía se refleja, pero un porcentaje de ésta es absorbida por el nuevo medio. Los materiales tienen un coeficiente de absorción que indica la cantidad de sonido que absorbe una superficie en relación con la cantidad de sonido incidente.

Dicha reducción energética, viene dada generalmente por los siguientes elementos: El público y las sillas, los materiales absorbentes selectivos (resonadores), superficies límite de la sala susceptibles de entrar en vibración (puertas, ventanas,...), el aire y los materiales rígidos no porosos utilizados en la construcción de las paredes y techos de los recintos (hormigón).

Las características de absorción de los materiales absorbentes y de los resonadores dependen no solo de sus propiedades físicas, sino también en gran parte de un sinfín de condicionantes y de detalles constructivos. Por ello, para realizar cualquier diseño resulta imprescindible disponer de los coeficientes de absorción α obtenidos mediante ensayos de laboratorio.

Tipos de materiales en función de su absorción:



- Materiales resonantes: Son los que presentan absorción máxima a una frecuencia determinada, la frecuencia de resonancia o propia del material.
 - Materiales porosos: Absorben más sonido a medida que aumenta la frecuencia.
 - Materiales absorbentes en forma de panel o membrana: Absorben más sonido a frecuencias bajas.
 - Materiales absorbente Hemholtz: Es un tipo de absorbente creado artificialmente que elimina específicamente unas determinadas frecuencias.
- REFLEXIÓN DEL SONIDO

El diseño de elementos reflectores, posibilita la aparición de primeras reflexiones útiles en la zona del público. Dichos elementos están constituidos por materiales lisos, no porosos y totalmente rígidos capaces de reflejar la mayor parte de la energía sonora que incide sobre ellas.

No todas las salas precisan de elementos reflectores, pero sí aquellas destinadas a la palabra (teatros y salas de conferencias), y a la música no amplificada (salas de conciertos sinfónicos).

Pero no todas las reflexiones son útiles, ya que dependiendo del uso que se le vaya a dar a la sala, dichas reflexiones deberán actuar en tiempos diferentes. En el caso de salas destinadas a la palabra, serán útiles todas aquellas reflexiones que lleguen al receptor dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo. Para el caso de salas destinadas a música, se amplía hasta los 80 ms.

El aumento de las primeras reflexiones, incrementa la sonoridad y la claridad musical. Si además esas reflexiones son laterales, se produce un incremento del grado de impresión espacial.

- DIFUSIÓN DEL SONIDO

La difusión del sonido en una sala se consigue mediante la colocación de elementos expresamente diseñados para dispersar, de forma uniforme y en múltiples direcciones, la energía sonora que incide sobre los mismos.

La existencia de difusión en salas de conciertos significa que la energía de campo reverberante llegará a los oídos de los espectadores por igual desde todas las direcciones del espacio. Ello contribuirá a crear un sonido altamente envolvente y, por tanto, a aumentar el grado de impresión espacial existente. Cuanto mayor sea el grado de impresión espacial, mejor será la valoración subjetiva de la calidad acústica del recinto.

En ocasiones, la difusión es también utilizada para eliminar alguna de las anomalías que pueden aparecer tanto en recintos destinados a la palabra, como en salas de conciertos.

Dichas anomalías pueden aparecer en forma de coloraciones, desplazamiento de la fuente sonora, ecos, o focalizaciones del sonido.

Si bien cualquier superficie produce un cierto grado de difusión, la existencia de ornamentación, nichos, irregularidades y relieves en las superficies de una sala provoca un notable incremento de la difusión. Es el caso de salas de conciertos clásicas, repletas de molduras decorativas, estatuas, y techos artesonados.

2.4 LA RESPUESTA AL IMPULSO

Para explicar la respuesta al impulso vamos hacer un resumen del Teorema de Fourier. El principio fundamental del teorema de Fourier dice que toda señal puede ser representada como la suma de señales armónicas.

Sea $x(t)$ una señal real no periódica, suficientemente estable, requerimiento cumplido en todos los casos prácticos, cuya integral $\int_{-\infty}^{\infty} [x(t)]^2 dt$ es de valor finito, entonces:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{2\pi jft} df$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi jft} dt$$

La función $X(f)$, transformada de Fourier TF de $x(t)$, también se denomina espectro de la señal. Tanto $X(f)$ como $x(t)$ son representaciones completamente equivalentes de la misma señal [2].

Un sistema LTI¹ (lineal e invariante temporal) se caracteriza por su respuesta al impulso $h(t)$ y por su respectiva función de transferencia asociada $H(f)$. Definimos $h(t)$ o respuesta impulsional como el comportamiento de una sala frente a un estímulo sonoro cuando se la excita con una señal impulsional, función delta o señal de duración muy breve y de amplitud elevada. Aunque es imposible obtener amplitud infinita en un intervalo infinitamente corto e cualquier sistema real, es un concepto útil como idealización debido a su facilidad de cálculo. En la práctica se utilizarán aproximaciones de impulsos.

La función delta $\delta(t)$ puede ser representada como:

$$\delta(t) = \lim_{f_0 \rightarrow \infty} \int_{-f_0}^{+f_0} e^{2\pi jft} df$$

En la siguiente propiedad fundamental de la función delta podemos ver que cualquier señal función del tiempo puede ser considerada como una sucesión de impulsos.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \delta(t - \tau) d\tau$$

Para $x(t) = 1$ se obtiene que $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$, entonces la función es 0 para $t \neq 0$ y su valor en $t = 0$ es infinito.

¹ En procesamiento de señales, un sistema LTI es aquel que cumple las propiedades de linealidad e invarianza temporal. El sistema es lineal si satisface el principio de superposición que engloba las propiedades de aditividad y superposición. Un sistema es invariante en el tiempo si sus propiedades no cambian con él.

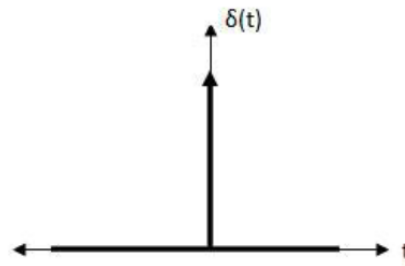


Fig. 13 Función delta de dirac

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & x = 0; \\ 0, & x \neq 0; \end{cases}$$

Cada par de puntos emisor-receptor de una habitación pueden ser considerados la entrada y salida de un sistema de transmisión acústica. Si éste es lineal e invariante temporal, su IR asociada describirá completamente los cambios que sufre una señal sonora mientras viaja desde el punto emisor al receptor. Estará formada por el sonido directo o el sonido que llega directamente al receptor y por las ondas reflejadas en las diferentes superficies que forman la sala. Si analizamos el sonido reflejado podemos diferenciar dos zonas, las primeras reflexiones y la cola reverberante formada por reflexiones tardías.

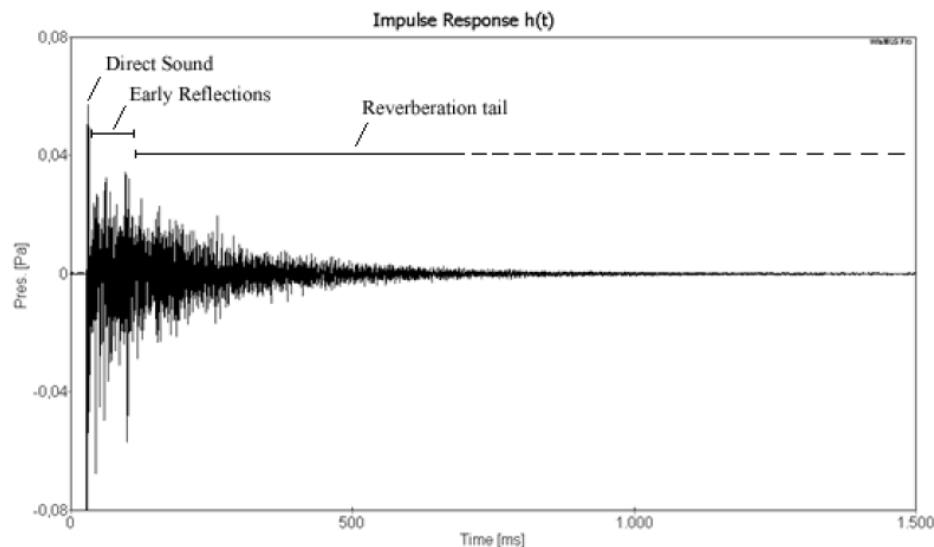


Fig. 14 Respuesta de impulso emisor-receptor compuesta por sonido directo, primeras reflexiones y cola reverberante

Podemos expresar la salida del sistema como:

$$y(t) = x(t) * h(t) = h(t) * x(t)$$

Y su análoga en el dominio de la frecuencia sería:

$$Y(f) = X(f)H(f)$$

La función compleja $H(f)$ también se denomina función de transferencia del sistema y tiene un significado directo: si una señal armónica de frecuencia f es aplicada a un sistema de transmisión, su amplitud será alterada por el factor $H(f)$ y su fase desplazada por la fase de $H(f)$.

Por tanto, por su propia definición, la IR de una sala es la señal $y(t)$ obtenida en el receptor cuando la señal $x(t)$ emitida por la fuente situada en el emisor sea una delta de Dirac $\delta(t)$ [2].

$$y(t) = h(t) * \delta(t) = h(t)$$

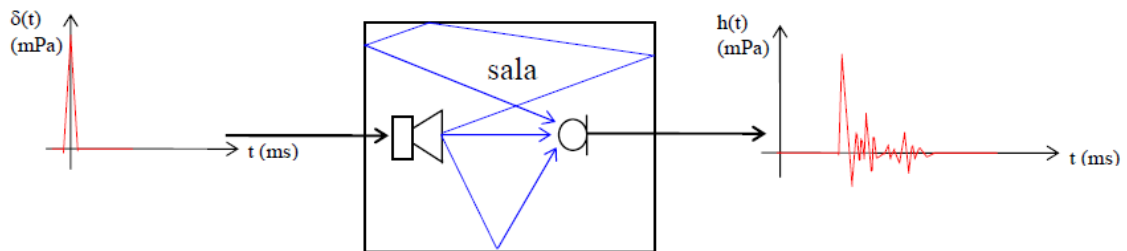


Fig. 15 Obtención de la respuesta impulsional de una sala

• MEDIDA DE LA RESPUESTA DE IMPULSO

En la práctica, es imposible crear y emitir funciones delta de Dirac verdaderas, sino, únicamente sonidos cortos transitorios como el sonido de un disparo. Sin embargo, a continuación describimos las posibles señales de excitación que se utilizan.

Señales aleatorias:

Consiste en emitir un ruido aleatorio durante el tiempo suficiente para alcanzar un nivel estable. Al tener una densidad espectral constante, las señales aleatorias parecen adecuadas para obtener una correcta respuesta impulsiva.

La diferencia en este caso es que, en vez de obtener la respuesta impulsiva deconvolucionando la salida $y(t)$ con la entrada $x(t)$, la teoría de sistemas de señales nos indica que la correlación cruzada de dos señales $x(t)$ e $y(t)$, entrada y salida de un sistema, es igual a la autocorrelación de la señal de entrada convolucionada con la respuesta impulsiva del sistema.

Este tipo de señales no son lo suficientemente repetitivas, lo cual provocará una falta de fiabilidad en los resultados.

Señales pseudoimpulsivas:

El más sencillo de los métodos para obtener la IR de un sistema consiste en utilizar fuentes acústicas que generan sonidos transitorios muy breves y de gran potencia. De esta forma, pueden ofrecer aproximaciones suficientemente buenas de la excitación impulsiva ideal. Son las llamadas fuentes pseudo-impulsivas y dentro de esta categoría, dependiendo de la forma en que el impulso es generado, pueden distinguirse varios tipos: fuentes explosivas, fuentes impulsivas de origen eléctrico, fuentes basadas en aire comprimido y fuentes cuya generación de impulso se fundamenta en impactos mecánicos.

Su principal ventaja es su bajo coste y la sencillez de la implementación del sistema de medida.

La dificultad común para este tipo de fuentes está en satisfacer un rango dinámico adecuado para las bajas frecuencias. La duración del impulso, por definición, es muy corta, siendo muy difícil emitir suficiente energía para superar el ruido de fondo presente. Asimismo es necesario que la fuente sea razonablemente omnidireccional, es decir, que emita por igual en todas las direcciones.

Señales pseudoaleatorias:

Este tipo de señales surgen para solucionar el problema de las señales aleatorias, la repetitividad. Por eso este tipo de señales son deterministas, es decir, tratan de emular un sonido aleatorio, pero en realidad no lo es.

a) Maximum length sequences (secuencias de máxima longitud – MLS)

Las señales de excitación con espectro blanco permiten el uso de la correlación cruzada para obtener la IR del sistema mediante técnicas de deconvolución.

Tienen unas propiedades, como que su autocorrelación es muy próxima a la delta de Dirac, que las hacen adecuadas para mediciones de funciones de transferencia.

Una MLS es una discreta secuencia de números que conmuta entre dos valores en un modo casi aleatorio.

Secuencias de impulsos binarios que destacan por su facilidad de creación y procesamiento, secuencias de igual longitud pero de polaridad cambiante siguiendo un patrón determinado.

Poseen un espectro perfectamente plano con una amplitud de pico del orden de 100 veces menor que la de un impulso de su misma energía, lo que permite aumentar la potencia suministrada al sistema. De este modo, la señal de excitación se reparte durante todo el periodo de medida, incrementando notablemente la *SNR* obtenida.

Las técnicas de medida basadas en señales *MLS* poseen algunas desventajas. Junto con su vulnerabilidad a la distorsión y a la variación temporal, su espectro puramente blanco es considerado hoy en día una limitación.

b) Barrido sinusoidal o barridos frecuenciales (sweeps)

Son señales deterministas, consiguiendo así una mejor relación señal ruido y menor vulnerabilidad frente a la varianza del tiempo. El resultado obtenido será mejor con los barridos sinusoidales que con las señales anteriores. Aumentando la duración del sweep se mejora la relación señal ruido y disminuye la influencia de la variación frente al tiempo.

Al utilizar barridos sinusoidales como señal de excitación, en cada instante la sala es excitada con una única frecuencia facilitando la localización de los armónicos y por tanto su eliminación.

Se puede definir como una Delta de Dirac extendida en el tiempo.

Conseguimos una mejor relación señal-ruido ya que podemos aumentar la potencia suministrada al altavoz por la razón anterior y sin riesgo de dañarlo y también, conseguimos una menor vulnerabilidad frente a la varianza del tiempo

ya que aumentamos la relación señal ruido sin tener que aumentar la duración de la medida.

2.5 CURVA DE DECAIMIENTO ENERGÉTICO

Es la representación gráfica del decrecimiento del nivel de presión acústica de un recinto en función del tiempo, una vez que la fuente sonora ha dejado de emitir.

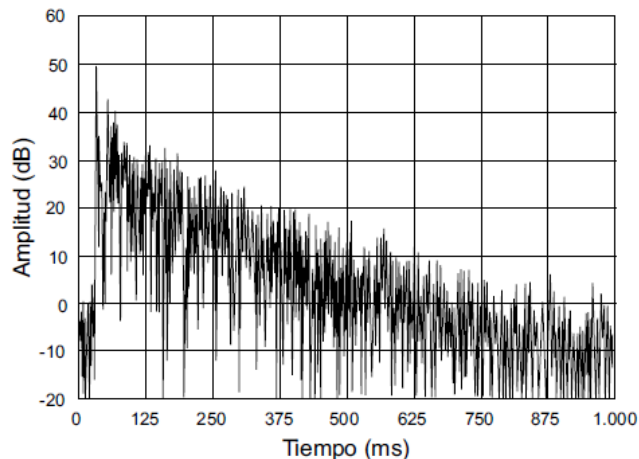


Fig. 16 Curva energía - tiempo ETC medida en un punto de un recinto

En un recinto, se puede obtener esta representación gráfica, emitiendo un sonido intenso y breve o mediante técnicas modernas TDS (“Time Delay Spectrometry”) o MLS (“Maximum Length Sequence”), en éstos últimos casos se denomina ETC o curva de decaimiento energético.

El tiempo de reverberación se calcula a partir de esta curva medida en un punto cualquiera de la sala.

La obtención del tiempo de reverberación a cada frecuencia de interés, a partir de la correspondiente curva ETC, no se lleva a cabo directamente por simple observación del tiempo que transcurre hasta que el nivel disminuye 60 dB. Ello es debido a que dicha curva presenta irregularidades, a pesar de que su decaimiento asintótico es efectivamente en forma de línea recta.

El motivo de la aparición de dichas irregularidades es que en ningún recinto real existe un campo sonoro perfectamente difuso. Teóricamente, sería necesario repetir la medida de la curva ETC un número infinito de veces para, posteriormente, obtener una curva promedio exenta ya de irregularidades.

En la práctica, la determinación del T se realiza aplicando el método de Schroeder. Dicho investigador demostró matemáticamente que la curva promedio anterior se puede obtener de forma totalmente equivalente a base de integrar todas las contribuciones energéticas asociadas a una única curva ETC, desde un instante de tiempo infinito (en la práctica, habitualmente entre 1 y 3 segundos) hasta el instante inicial.

2.6 PARÁMETROS ACÚSTICOS PARA LA EVALUACIÓN ACÚSTICA DE SALAS

Para el estudio de las propiedades acústicas de una sala, y la obtención de sus cualidades subjetivas y poder valorar si las características del recinto son las adecuadas para el tipo de actividad que se va a desarrollar en él, los investigadores estudiaron parámetros acústicos diferentes para su posterior evaluación y comparación basándose en unos valores recomendados que se obtuvieron siguiendo un procedimiento empírico.

Haciendo uso del método de la respuesta impulsiva se podrán obtener los diferentes parámetros acústicos que derivan de esta.

El tiempo de reverberación está considerado como un parámetro fundamental que proporciona una descripción del carácter acústico de un auditorio o recinto, pero con los valores asociados a los demás parámetros obtenidos a partir de la respuesta de impulso, se logrará una descripción más detallada del carácter acústico de una sala.

2.6.1 CRITERIO TEMPORAL

A partir del análisis de la curva sonora o curva de decaimiento energético, se han estudiado diferentes parámetros que pueden correlacionarse óptimamente con la impresión subjetiva, medidos en diferentes salas y ensayados en modelos computacionales y en auditorios reales. Cuantifican el grado de viveza de la sala y estudiaremos dos: El tiempo de reverberación (T) y Early Decay Time (EDT).

Otras cualidades acústicas fundamentales que se cuantifican a partir de los valores del tiempo de reverberación que también estudiaremos en este grupo son la Calidez (Bass Ratio, BR) y el Brillo (Br) que cuantifican la respuesta de la sala en bajas frecuencias y la riqueza en armónicos respectivamente.

2.6.1.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN (T)

Subjetivamente el tiempo de reverberación se interpreta como el tiempo de persistencia de un sonido en un recinto hasta hacerse inaudible.

Técnicamente el tiempo de reverberación a una frecuencia determinada es el tiempo (en segundos) que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora SPL cae 60 dB con respecto a su valor inicial.

Se pueden clasificar los recintos en función de su grado de “viveza”:

- Recinto “vivo”: Recintos con un Tiempo de reverberación (T) grande. (Nave industrial, iglesias...).
- Recinto “apagado” o “sordo”: Recintos con un Tiempo de reverberación (T) pequeño. (Locutorios, estudios de grabación...).

Se puede también evaluar el T basándose en un rango dinámico inferior a 60 dB y extrapolando a un tiempo de decrecimiento de 60 dB. Si el T se deriva del tiempo en que

la curva de decrecimiento alcanza primero 5 dB y 25 dB por debajo del nivel inicial, adquiere el nombre de T_{20} . Si se utilizan valores de decrecimiento de entre 5 dB y 35 dB por debajo del nivel inicial se denomina T_{30} .

El tiempo de reverberación varía con la frecuencia, tendiendo a disminuir a medida que ésta aumenta.

Ello es debido, en parte, a las características de mayor absorción con la frecuencia de los materiales comúnmente empleados como revestimientos, así como a la absorción del aire, especialmente manifiesta en recintos grandes y a altas frecuencias. En general, añadir material acústico absorbente en un recinto reduce el nivel de presión acústica de las ondas reflejadas y también disminuye el tiempo que tarda en desaparecer el sonido desde que la fuente deja de emitir, es decir, el tiempo de reverberación.

- Cálculo del tiempo de reverberación

En 1898 W.C. Sabine propuso la primera ecuación que permitía calcular el tiempo de reverberación en un recinto.

Consiste en relacionar el volumen de la sala (V) y la absorción total (A) con el tiempo que tarda el sonido en disminuir 60 dB en intensidad, a partir de que se apaga la fuente sonora. La correspondiente expresión matemática, obtenida aplicando la teoría acústica estadística y despreciando el efecto de la absorción producida por el aire, es la siguiente:

$$T = 0,161 \frac{V}{A_{\text{tot}}} \quad (\text{en segundos})$$

Donde,

V es el volumen de la sala (m^3).

A_t es la absorción total del recinto (en sabins).

Se define Absorción total de un recinto (A_t) ya que un recinto está formado por diferentes superficies como la suma de todas las absorciones individuales:

$$A_{\text{tot}} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$

Donde α es el coeficiente de absorción de un material y se define como la relación entre la energía absorbida por un material y energía incidente por el mismo.

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}}$$

Sus valores están comprendidos entre 0 (correspondiente a un material totalmente reflectante) y 1 (caso de absorción total). El valor de α está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia.

En cuanto a la denominada absorción A de un material cualquiera, ésta se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción α por su superficie S .



Existen las formulaciones de Eyring y Norris, Millington y Sette, Fitzroy y muchos más investigadores que han realizado fórmulas más exactas a la de Sabine. Más actuales son las fórmulas del cálculo del tiempo de reverberación de Higini Arau Puchades. Hasta la llegada de estos descubrimientos, el cálculo del tiempo de Reverberación necesitaba:

- Distribución uniforme y campo difuso en todos los puntos del recinto.
- Igual probabilidad de propagación en todas las direcciones.
- Absorción continua y constante en todos los puntos e instantes del recinto.

La fórmula de Arau-Puchades es capaz de calcularlo considerando que exista una distribución asimétrica de la absorción en una sala.

La expresión matemática del tiempo de reverberación formulada por Eyring es la siguiente, aplicable cuando los coeficientes de absorción sonora son de valores numéricos parecidos en todas las superficies límites:

$$T = \frac{0,161 V}{-\ln(1-\bar{\alpha}) S_{\text{tot}} + 4mV} \quad (\text{en s})$$

Donde,

V es el volumen de la sala (m³).

S_{tot} es la superficie total del recinto (m²).

m es la constante de atenuación del sonido en el aire (m⁻¹).

Y por último, la fórmula de Arau-Puchades:

$$T = \left(\frac{0.161V}{S\alpha_x} \right)^{S_x/S} \left(\frac{0.161V}{S\alpha_y} \right)^{S_y/S} \left(\frac{0.161V}{S\alpha_z} \right)^{S_z/S}$$

Donde,

V es el volumen de la sala (m³).

S es el área total de la superficie de la sala (m²).

S_x es el área de la superficie suelo más techo.

S_y es el área de la superficie pared lateral izquierda más pared lateral derecha.

S_z es el área de la pared frontal más la del fondo.

- Valores recomendados del tiempo de reverberación

TIPO DE SALA	RT_{mid} , SALA OCUPADA (EN s)
Sala de conferencias	0,7 – 1,0
Cine	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

Donde T_{mid} es la media aritmética de los valores correspondientes del tiempo de reverberación en las bandas de 500 Hz y 1000 Hz. Habitualmente si se establece un único valor para el T se suele referir a éste. En la tabla tenemos los márgenes de valores recomendados según el tipo de sala.

2.6.1.2 EARLY DECAY TIME (EDT)

El parámetro EDT se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB. Está más relacionado con la impresión subjetiva de viveza que el T usado tradicionalmente. El decaimiento teórico de la energía sonora en una sala sigue una evolución exponencial, que se traduce en una línea recta al pasar a escala semi-logarítmica. Dicho decaimiento se produciría solamente en el caso hipotético de que existiese una perfecta difusión del sonido en el recinto producida por una geometría regular del mismo y por una distribución homogénea y uniforme de los materiales utilizados como revestimientos. En tal caso, el valor de EDT coincidiría con el de T.

En la práctica, el correspondiente valor del EDT puede variar significativamente diferente que el T debido que la curva de decaimiento energético puede presentar en distintos puntos de la sala una doble pendiente como consecuencia de una falta de difusión perfecta. Por ejemplo, en las siguientes situaciones:

- Cuando hay dos recintos acoplados (podría ser escenario y audiencia como en los teatros de proscenio, o la sala y el recinto que se forma sobre los reflectores del techo).
- En recintos con balcones profundos.
- Cuando se está cerca de un resonador (ej. un instrumento de cuerda).
- Electro-acústicamente producido.

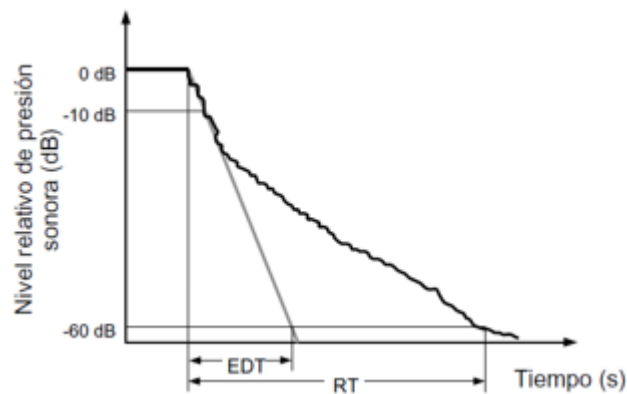


Fig. 17 Curva energía - tiempo EDT medida en un punto de un recinto

Esto significa que, en todos aquellos puntos de una sala con un EDT significativamente menor que el T, la sala resultará, desde un punto de vista subjetivo, más apagada de lo que se deduciría del valor de T.

Con objeto de garantizar una buena difusión del sonido en una sala ocupada, es preciso que el valor medio de los EDT correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz sea del mismo orden que T_{mid} :

$$EDT_{mid} \approx T_{mid}$$

Los valores recomendados para el EDT, según H.Arau [3], en el caso de teatros resulta adecuado que el valor del EDT_{mid} esté entre $0.6T_{mid}$ y $0.75T_{mid}$, para ópera entre $0.75T_{mid}$ y $1T_{mid}$, y para salas de concierto entre $0.9T_{mid}$ y T_{mid} .

Valores óptimos de EDT	
Uso de la sala	EDT (s)
Teatro	$0.6 \cdot T_{mid} \leq EDT \leq 0.75 \cdot T_{mid}$
Ópera	$0.75 \cdot T_{mid} \leq EDT \leq 1 \cdot T_{mid}$
Sala de conciertos	$0.9 \cdot T_{mid} \leq EDT \leq 1 \cdot T_{mid}$

2.6.1.3 CALIDEZ (Bass Ratio, BR) Y BRILLO (Br)

El tiempo de reverberación no se relaciona únicamente con el grado de viveza de la sala sino también con la Calidad y Brillo de la misma.

Dan una idea de respuesta de la sala a bajas y altas frecuencias.

Las bajas frecuencias comprendidas entre 125 y 250 Hz son reconocidas por el cerebro como el cuerpo de la música y corresponden a los tonos propios de la voz masculina, el violonchelo, el fagot, etc. Por ello, si el efecto reverberante refuerza la percepción de esta banda, la impresión musical que predomina es la calidez, la riqueza en graves, melosidad y suavidad de la música [4].

La **Calidez (BR)** representa la riqueza de la sala a bajas frecuencias. Como medida objetiva

de la calidez, se suele utilizar la relación entre el valor medio del tiempo de reverberación T a frecuencias graves (125 Hz y 250 Hz), T_{low} , y el valor medio del T a frecuencias medias (500 Hz y 1 kHz), T_{mid} .

$$BR = \frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{500} + RT_{1000}}$$

$$BR = \frac{RT_{low}}{RT_{mid}} (s)$$

Una sala cálida tendrá riqueza de graves y presentará dulzura y suavidad para la música.

Las bandas de frecuencias entre 2000 y 4000 Hz corresponden a los armónicos más audibles y define el brillo, la claridad, la expresividad... A su vez, el timbre de los instrumentos musicales depende en su casi totalidad, de esta banda de frecuencias [5]. Dada la importancia que tienen estas frecuencias, se comprende que las calidades reverberantes del recinto deben reforzar la audición de los armónicos 2000 y 4000 Hz.

El **Brillo (Br)** se obtiene como el cociente entre el valor medio del tiempo de Reverberación T a frecuencias altas (2 KHz y 4 KHz), T_{high} , y el valor medio del T a frecuencias medias (500 Hz y 1 KHz), T_{mid} .

$$Br = \frac{RT_{2000} + RT_{4000}}{RT_{500} + RT_{1000}}$$

$$Br = \frac{RT_{high}}{RT_{mid}} (s)$$

El término brillante es indicativo de que el sonido en la sala es claro y rico en armónicos.

- Valores recomendados Calidez y Brillo

Valores óptimos Calidez (BR)			
Autor	Uso recinto (ocupado)	Calidez Recomendada (BR)	
L.L Beranek	Sala de conciertos	Si $T_{mid} = 2,2$ s	$1,10 \leq BR \leq 1,25$ s
		Si $T_{mid} = 1,8$ s	$1,10 \leq BR \leq 1,45$ s
Valores óptimos Brillo (Br)			
Autor	Brillo sala ocupada (Br)		
L.L Beranek	$Br \geq 0.87$ s		

Los valores recomendados para el parámetro BR para valores distintos de esos T_{mid} deberán hallarse por interpolación.

El criterio acústico para música es muy estricto indicando que la calidez valga 1,2 como valor óptimo; no obstante, para teatro puede valer desde 0,9 hasta 1,3 siendo bueno tender al valor 1,1 [3].

El valor de esta magnitud tiene que ser lo más alto posible, teniendo presente que es difícil que pueda llegar a 1 debido a la absorción del aire, pero intentando que no sea en ningún caso inferior a 0,8 [3].

2.6.2 CRITERIO ENERGÉTICO

Estos parámetros relacionan energía temprana con energía tardía. Están asociados a las primeras reflexiones, la existencia de primeras reflexiones en un punto de la sala produce un aumento de inteligibilidad y sonoridad.

Estudiaremos tres parámetros dentro de este grupo:

- Claridad de la voz (C_{50})
- Claridad musical (C_{80})
- Definición (D)

Cuanto mayor sea el valor de estos parámetros, más elevada será la inteligibilidad o sonoridad en el punto considerado.

2.6.2.1 CLARIDAD DE LA VOZ (C_{50})

La claridad de la voz C_{50} es un parámetro relacionado con la inteligibilidad del mensaje oral.

Es la relación entre la energía del sonido que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo, es decir, incluye el sonido directo y las primeras reflexiones, con las que llegan más tarde. Muestra el grado de separación entre los diferentes sonidos de un mensaje oral.

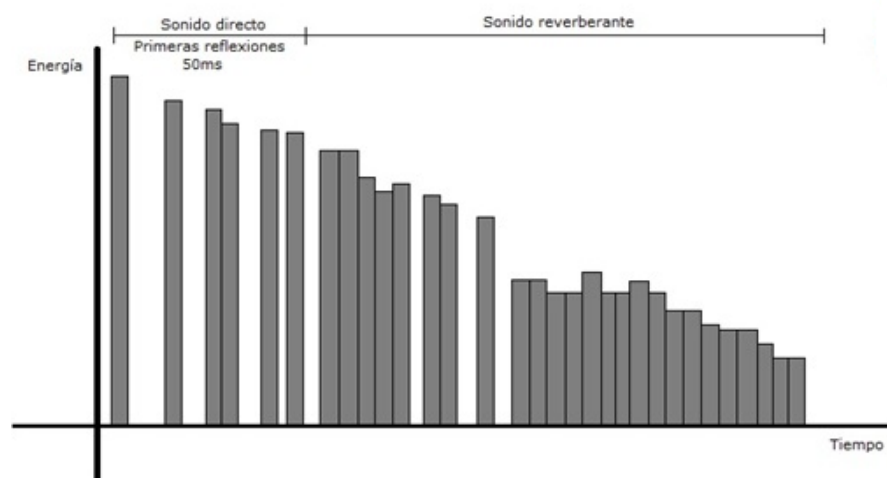


Fig. 18 Curva energía - tiempo ETC medida en un punto de un recinto

Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 KHz y se expresa de forma logarítmica.

$$C_{50} = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía después 50 ms}} \text{ (dB)}$$

- **“Speech average”**: Según L.G. Marshall, un valor representativo del parámetro C_{50} se puede calcular como la media aritmética ponderada de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz. Los factores de ponderación son: 15%, 25%, 35% y 25%, respectivamente, de acuerdo con la contribución estadística aproximada de cada banda a la inteligibilidad de la palabra.

$$C_{50} (\text{“speech average”}) = 0,15 \cdot C_{50} (500 \text{ Hz}) + 0,25 \cdot C_{50} (1 \text{ kHz}) + 0,35 \cdot C_{50} (2 \text{ kHz}) + 0,25 \cdot C_{50} (4 \text{ kHz})$$

- Valores recomendados Claridad de la voz (C_{50})

$$C_{50} > 2 \text{ dB}$$

Los valores recomendados en ingeniería acústica para el parámetro C_{50} están por encima de los 2 dB. Si el valor calculado de este parámetro está por debajo de los 2 dB, el mensaje oral emitido resultaría confuso.

Cuanto más elevado sea dicho valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el punto considerado.

2.6.2.2 CLARIDAD MUSICAL (C_{80})

La claridad musical C_{80} indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical.

Nos da información respecto a la cantidad energía sonora que llega dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la energía que llega con posterioridad. Éste parámetro es análogo a la claridad de la voz pero ampliado al intervalo de recepción de energía inicial a 80 ms, correlacionado bien con la percepción subjetiva de la calidad de la música.

$$C_{80} = \frac{\text{Energía hasta 80 ms}}{\text{Energía después 80 ms}} \text{ (dB)}$$

Un C_{80} alto, significa que la energía sonora inmediata es muy superior a la tardía, entonces diremos que el sonido es muy claro.

Esto quiere decir que dentro de los primeros 80 ms se producirán muchas más reflexiones

que provienen de paredes o techos próximos al oyente, que reflexiones generales debidas a restantes superficies de la sala.

Cuando esto sucede obtendremos generalmente que el tiempo de reverberación inmediato, dentro de los primeros 10 dB de caída, llamado EDT, será mucho más pequeño que el tiempo de reverberación medio del recinto.

Este fenómeno es altamente detectado en balcones y en anfiteatros en los que el techo sea relativamente bajo, y en techos de salas en que no se produzca la difracción del sonido y que la reflexión especular sea muy direccional e intensa hacia el oyente.

- Valores recomendados Claridad musical (C_{80})
 - “Music average”: Beranek recomienda como valor representativo el calculado para el rango de frecuencias 500Hz, 1KHz y 2KHz.

Recomienda que el valor para sala vacía esté comprendido entre:

$$-4 \leq C_{80} \leq 0 \text{ dB}$$

Según L.G. Marshall, los valores recomendados para sala ocupada están entre:

$$-2 \text{ dB} \leq C_{80} \leq +2 \text{ dB}$$

H. Arau [3], establece la siguiente clasificación de valores recomendados:

- Salas de concierto: $-2 \text{ dB} < C_{80} < 4 \text{ dB}$
- Salas de ópera: $-2 \text{ dB} < C_{80} < 4 \text{ dB}$, cuándo el sonido es emitido desde el escenario.
- Sala de teatro: $C_{80} > 6 \text{ dB}$

2.6.2.3 DEFINICIÓN (D)

Es la relación entre la energía del sonido que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo, es decir, incluye el sonido directo y las primeras reflexiones, y la energía total recibida por el mismo.

Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz:

$$D = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía total ms}} (\text{dB})$$

El valor de D varía en función de la posición del oyente respecto a la sala. La situación óptima se da cuando se sitúa frontalmente, y va empeorando a medida que realiza una rotación.

El diseño de un recinto destinado a la palabra ha de encaminarse hacia la obtención de la máxima invariabilidad de este parámetro con independencia de la posición del actor en el escenario.



- Valores que debe cumplir (D)

En cada punto de una sala ocupada y en cada banda de frecuencias se debe cumplir:

$$D > 0.5$$

Cuanto mayor sea el valor de la definición, mejor será la inteligibilidad y la sonoridad en la sala.

2.6.3 FUERZA ACÚSTICA O SONORIDAD (G)

Representa el grado de amplificación acústica producido por la sala entre el punto de emisión y el punto de recepción.

Su valor depende de:

- La distancia entre el oyente y la fuente: Disminuye al aumentar dicha distancia.
- Energía asociada a las primeras reflexiones: Aumenta cuándo aumenta el número de las primeras reflexiones.
- Grado de ocupación del público: Disminuye si el grado de ocupación es alto, debido a la absorción del público.
- Nivel del campo reverberante: Aumenta al aumentar la contribución energética debida a la reverberación.

Se define como el nivel producido por la fuente sonora en el punto medido menos el nivel que produciría dicha fuente, emitiendo a la misma potencia, dentro de una cámara anecoica (o campo libre) en un punto situado a 10 m de distancia de la fuente:

$$G = 10 \cdot \log \left(\frac{\int_0^\infty h^2(t) dt}{\int_0^\infty h_{A,10}^2(t) dt} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{E_T}{E_{T(A,10)}} \right) \quad (\text{dB})$$

Donde,

$h_{A,10}$ es la respuesta al impulso medida con la misma fuente sonora en una cámara anecoica a 10 m de distancia.

$$E_{T(A,10)} = \frac{r^2}{10^2} \int_0^{\Delta\tau} h^2(t) dt$$

- Valores recomendados de la fuerza acústica

Los valores de G óptimos para una sala de conciertos vacía, según Beraneck deben estar comprendidos entre 4 y 5.5 dB.

2.6.4 PARÁMETROS LATERALES

Estos parámetros están relacionados con la energía de las primeras reflexiones laterales. Permiten cuantificar el grado de ASW (amplitud aparente de la fuente sonora). El ASW está directamente relacionado con la impresión espacial del sonido, cuanto mayor sea el ASW mayor será la impresión espacial del sonido y mejor resultará la valoración acústica subjetiva de la sala.

Según A. H. Marshall y Barron, la ASW aumenta con el número de primeras reflexiones que inciden lateralmente sobre el oyente. Ello es debido a que el oído las suma con el sonido directo, con lo cual la localización de la fuente tiende a ser ambigua. También, cuanto mayor sea la diferencia entre dos sonidos que llegan al oyente, mayor será éste parámetro.

2.6.4.1 EFICIENCIA LATERAL (J_{LF})

Según A. H. Marshall, la eficiencia lateral J_{LF} ("Lateral energy Fraction") se define como la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (se excluye el sonido directo) y la energía recibida en todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo:

$$J_{LF} = \frac{\text{Energía lateral hasta 80 ms (excluyendo el sonido directo)}}{\text{Energía total hasta 80 ms}}$$

- $J_{LF\ E4}$: Es el valor medio que se utiliza habitualmente de los J_{LF} correspondientes a las bandas de octava comprendidas entre 125 Hz y 1kHz.

$$J_{LF\ E4} = \frac{J_{LF}(125\text{ Hz}) + J_{LF}(250\text{ Hz}) + J_{LF}(500\text{ Hz}) + J_{LF}(1\text{ kHz})}{4}$$

- Valores recomendados $J_{LF\ E4}$

Para una sala vacía:

$$J_{LF\ E4} \geq 0,19$$

Según Barron, los valores recomendables para J_{LF} , en salas de concierto son:

$$0,1 \leq J_{LF\ E4} \leq 0,35$$

Cuanto más elevado sea el valor de $J_{LF\ E4}$, mayor será la ASW y, por consiguiente, el grado de espacialidad del sonido.

En la audición musical, la amplitud aparente de la fuente sonora ASW se asocia con la sensación de que el sonido que llega del escenario proviene de una fuente de mayor amplitud que la correspondiente a la orquesta real.

Cuanto mayor sea la ASW, mayor será la impresión espacial del sonido y mejor resultará la valoración subjetiva de la calidad acústica de la sala [1].

2.6.4.2 J_{LFC}

Se puede utilizar el J_{LFC} como alternativa a la eficiencia lateral J_{LF} , se considera subjetivamente más precisa.

Se utiliza normalmente el valor medio de los J_{LFC} correspondientes a las bandas de octava comprendidas entre 125 Hz y 1 kHz.

2.6.5 PARÁMETROS BINAURALES

2.6.5.1 CORRELACIÓN CRUZADA INTERAURAL (IACC)

Está asociada al grado de similitud entre las primeras reflexiones que llegan a ambos oídos y permite cuantificar el grado de ASW.

Se define como la correlación entre los sonidos que llegan a ambos oídos, y es indicativa del grado de similitud existente entre las dos señales. Si son iguales, el IACC valdrá 1, mientras que si son señales aleatorias independientes, el IACC será 0:

$$0 \leq \text{IACC} \leq 1$$

En la práctica, la medida es binaural, siendo tomada por dos micrófonos colocados en la las orejas de una cabeza artificial.

Están definidos dos IACC: IACC_E y IACC_L . Definidos por Hidaka, dónde el subíndice E corresponde a la palabra “Early” y se refiere a los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo. El subíndice L se refiere a “Late” y se calcula de los 80 ms hasta 1 s.

Como las bandas de frecuencias más representativas son las centradas en 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz, surgen los siguientes parámetros derivados como promedio de los valores de dichas bandas: IACC_{E3} e IACC_{L3} .

El IACC_{E3} permite cuantificar el grado de disimilitud entre las informaciones sonoras que llegan a ambos oídos, dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo. Cuanto más diferentes sean, menor será el valor de IACC_{E3} .

2.6.6 ÍNDICES DE INTELIGIBILIDAD

La calidad acústica de un recinto se puede determinar de manera general evaluando el ruido de fondo y el tiempo de reverberación, ya sea cual sea su uso, sea destinado a actos musicales o para la transmisión de la palabra.

Pero para salas destinadas a la palabra, la cuantificación del grado de inteligibilidad de ésta se lleva a cabo por los siguientes parámetros: RASTI, STI y %ALCons. Se consideran parámetros fundamentales. Para la música, no hace falta que la inteligibilidad sea muy buena pero para los teatros es un requisito fundamental.

Se ha podido demostrar que existe una muy buena correlación entre los valores de %ALCons y de STI / RASTI. Dicha correspondencia se muestra en la siguiente gráfica:

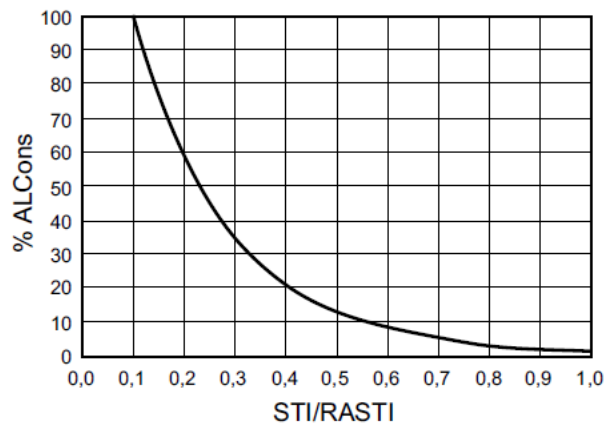


Fig. 19 Correspondencia entre STI / RASTI y %ALCons

Al emitir un mensaje oral, la duración de las vocales y su correspondiente nivel de presión sonora es mayor que el de las consonantes.

Además, el contenido frecuencial de las vocales es más rico en bajas frecuencias, en tanto que las consonantes presentan un mayor contenido de altas frecuencias.

En una sala con un tiempo de reverberación alto, el decaimiento energético de una vocal emitida en la misma es apreciablemente más lento que su decaimiento propio (aquel que se observaría si la vocal se emitiese en el espacio libre). Tal hecho, junto con la mayor duración y nivel comentados anteriormente, provoca un solapamiento temporal de la vocal con la consonante emitida inmediatamente después [1].

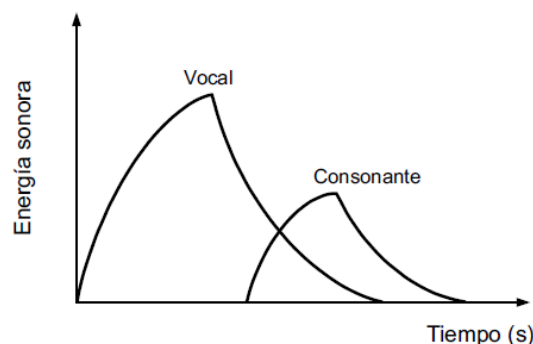


Fig. 20 Evolución temporal de la energía sonora correspondiente a la emisión de una vocal seguida de una consonante en un recinto cerrado

2.6.6.1 STI

El índice STI, definido por Houtgast y Steeneken, permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra entre los valores 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad

óptima). El STI se calcula a partir de la reducción de los diferentes índices de modulación “m” de la voz debida a la existencia de reverberación y de ruido de fondo en una sala.

2.6.6.2 RASTI

El índice de inteligibilidad RASTI (Rapid Speech Transmission Index), es una versión simplificada del índice STI, la simplificación consiste en reducir el número de frecuencias de modulación.

El procedimiento se basa en el análisis de la degradación de la modulación de una señal portadora de banda ancha modulada. Las señales moduladoras, sinusoides de baja frecuencia, reproducen las frecuencias con que modulamos nuestro discurso al hablar. Este índice ha sido ampliamente contrastado con numerosas pruebas subjetivas realizadas en múltiples idiomas [6].

El número de índices de modulación calculados es únicamente de 9, frente a los 98 utilizados en el caso del índice STI.

Se obtiene como una función que depende del tiempo, es la relación de la señal respecto al ruido de la sala y los posibles ecos. Sus valores varían del 0 al 1, siendo el 0 inteligibilidad nula y el 1 inteligibilidad óptima.

Podemos clasificar las salas siguiendo el siguiente criterio:

Valoración subjetiva	STI/RASTI
Mala	0 – 0,3
Pobre	0,3 – 0,45
Aceptable	0,45 – 0,60
Buena	0,60 – 0,75
Excelente	0,75 - 1

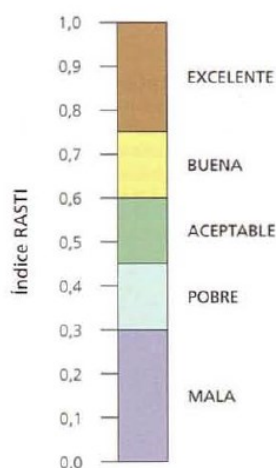


Fig. 21 Valoración subjetiva de la inteligibilidad a partir del índice RASTI

2.7 DIFERENCIAS PARÁMETROS MEDIDOS Y SIMULADOS

2.7.1 JUST NOTICEABLE DIFFERENCE (JND)

La diferencia apenas notable o just noticeable difference (jnd) es un parámetro relacionado con las sensaciones subjetivas utilizado en diversos campos.

Es la cantidad mínima por la cual la cantidad de un estímulo debe ser variado con el fin de obtener una variación notable en la experiencia sensorial.

En el campo de la acústica, se considera jnd a la mínima variación en el valor de un parámetro acústico perceptible por el oyente.

El jnd de un parámetro acústico es actualmente aceptado por la comunidad científica como el mejor indicador de cara a conocer la percepción subjetiva provocada por una variación en dicho parámetro. Puede usarse en muchas áreas: ofrece una orientación sobre la precisión con la que deberían medirse los parámetros acústicos objetivos; establece la precisión con que los modelos computacionales deberían ser capaces de simular un recinto; y es una herramienta fundamental para los acústicos para conocer si una alteración en el diseño de una sala será realmente apreciada por la audiencia [7].

Se le pueden dar multitud de aplicaciones, como por ejemplo, indicador de un buen funcionamiento de un modelo computacional, y además, evalúa si la diferencia entre dos parámetros es perceptible por el oyente.

El jnd tiene validez tanto para los valores promedio de los parámetros como para banda de octava.

La siguiente tabla muestra los jnd asociados a los diferentes parámetros acústicos.

Parámetro	jnd
EDT, T ₂₀ , T ₃₀	5% s
D ₅₀	5%
C ₅₀ , C ₈₀	1 dB
T _s	10 ms
G	1 dB
LF	0,05
IACC	0,08

Si el error entre el parámetro “real” (medido con cierta precisión) y el parámetro en la acústica de la sala simulada es menor que 1 jnd, entonces no hay diferencia perceptible y el resultado es bueno. En muchos casos es difícil o incluso imposible obtener resultados con tal precisión, por lo es probable que resultados peores también sean resultados satisfactorios para la mayoría de los propósitos.

2.7.2 ESTIMACIÓN ERROR EXPERIMENTAL

En una serie de medidas de magnitud cualquiera el error aleatorio siempre estará presente. El valor experimental es una desviación del valor medido de una magnitud física



respecto al valor real de dicha magnitud. En general los errores experimentales son ineludibles y dependen básicamente del procedimiento elegido y la tecnología disponible para realizar la medición.

Existen dos maneras de cuantificar el error en la medida: error absoluto y error relativo.

2.7.2.1 ERROR ABSOLUTO

El error absoluto lo representaremos en general por Δx y debe ser expresado en las mismas unidades que la magnitud medida x . De esta manera se obtiene:

$$\text{Valor medido} = x \pm \Delta x$$

Lo cual nos indica que el verdadero valor de la medida debe encontrarse en el siguiente intervalo:

$$x - \Delta x < \text{valor verdadero} < x + \Delta x$$

2.7.2.2 ERROR RELATIVO

El error absoluto no resulta suficiente para evaluar la precisión de una medida. Por esta razón introduciremos un nuevo concepto de error llamado error relativo, el cual se expresa como el cociente entre el error absoluto y el valor medido. Lo representaremos por ε_r , es decir:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta x}{x}$$

El error relativo es un valor adimensional.

2.7.2.3 ERROR PORCENTUAL

Generalmente el error relativo es mucho menor que la unidad y es adimensional, por ello frecuentemente damos el valor multiplicando el error relativo por 100 y expresando el resultado en tanto por ciento del valor medido.

$$\varepsilon_p(\%) = 100 * \varepsilon_r = 100 * \frac{\Delta x}{x}$$

El error relativo y el error porcentual se calculan en el caso de que se disponga de una sola medición.

3. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES. NORMATIVA VIGENTE PARA LA MEDIDA LA RESPUESTA DE IMPULSO

Desde el punto de vista de medidas experimentales que se ha recopilado de los diferentes auditorios con gran aforo, muchas de ellas se basarán en la Norma Internacional ISO 3382-1 (Parte 1, salas de espectáculos).

Esta norma consta de dos partes una primera dedicada a las salas de espectáculos y una segunda para recintos ordinarios. Y nos centraremos en la primera, realizada en el 2009.

Las mediciones del tiempo de reverberación se pueden hacer para cada uno de los estados de ocupación del recinto y si este cuenta con componentes regulables o condiciones que cambien la acústica, puede ser conveniente realizar medidas acústicas por separado para cada configuración.

Una descripción concreta del estado de la sala tiene una importancia decisiva en la evaluación de los resultados obtenidos durante la medición del tiempo de reverberación.

Por esta razón describiremos en cada caso el estado de la sala para su posterior evaluación y recreación similar en las simulaciones que se van a llevar a cabo con ODEON.

3.1 ESTADO DE OCUPACIÓN

El tiempo de reverberación varía en función del grado de ocupación de asientos por la audiencia.

- Estado sala vacía: Sala preparada para su uso pero sin público. Butacas vacías.
- Estado sala ocupada: Estado de ocupación de las butacas igual o superior al 80%.
- Estado de estudio (salas de oratoria y música): Sala ocupada por los ejecutantes u oradores y sin audiencia (ej.: ensayos, grabaciones. Se debe indicar el número de personas presentes (incluyendo ejecutantes y técnicos).

3.2 CONDICIONES DE MEDICIÓN

Las mediciones se pueden realizar en cualquiera de los tres estados de ocupación, indicando los mismos. Se deben tomar medidas separadas, considerando la capacidad de acústica variable de la sala.

La temperatura se debe medir con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$. La humedad se debe medir con una precisión de $\pm 5\%$.

- **INSTRUMENTACIÓN**

Fuente acústica:

La fuente debe ser omnidireccional, debe ser capaz de generar un nivel de presión acústica suficiente para poder generar las curvas de decrecimiento con el rango dinámico mínimo requerido sin contaminación por ruido de fondo.

Micrófonos y equipo de análisis y grabación:

Se deben utilizar micrófonos omnidireccionales para detectar la presión acústica y la salida se pueda conectar a un amplificador, un conjunto de filtros y un sistema donde se muestran las curvas.

Equipo de registro

El equipo para realizar el registro de decrecimiento debe utilizar alguno de los siguientes elementos:

- Promediado exponencial con curva continua como salida o con puntos de muestreo discretos sucesivos, a partir del promedio continuo como salida.
- Promediado lineal, con promedios lineales discretos sucesivos como salida.

El tiempo de promediado debe de ser inferior, pero lo más cercano a $T/30$. Si es promediado lineal sería a $T/20$ donde T es el tiempo de reverberación que se está midiendo.

- **POSICIONES DE MEDICIÓN**

Las posiciones de la fuente se deberían colocar donde se colocan habitualmente las fuentes sonoras y como mínimo han de ser dos. La altura del centro acústico de la fuente debe estar como mínimo a 1,5 m de distancia.

Las posiciones del micrófono se deberían colocar en posiciones representativas de las posiciones donde se encuentran habitualmente los oyentes. En las salas de conferencia y conciertos se debe colocar los micrófonos a una altura de 1,2 m del suelo.

3.3 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

Existen dos tipos de medida, el método por ruido interrumpido y el método de la respuesta impulsiva integrada.

Cuando no existan requisitos para bandas de frecuencias, deberían cubrir al menos desde 250Hz a 2000Hz, para los métodos de ingeniería y de precisión será de 125Hz hasta 4000Hz en banda de octava.

En el método de ruido interrumpido se utiliza un altavoz y la señal que recibe procede de un ruido eléctrico de banda ancha aleatorio o pseudoaleatorio. La fuente debe ser capaz de producir hasta unos 45 dB por encima del ruido de fondo en cada banda de frecuencias para poder calcular el T_{30} .

El número de posiciones determinará la precisión, pero teniendo en cuenta el carácter aleatorio de la fuente, es necesario calcular el promedio a partir del número de mediciones en cada posición para obtener una incertidumbre de medición más aceptable.

El promedio en cada posición de micrófono se puede calcular de dos formas diferentes: hallando los tiempos de reverberación individuales para todas las curvas de decrecimiento y sacando el valor medio, o haciendo una media del conjunto de los decrecimientos de presión acústica al cuadrado y hallando el tiempo de reverberación de la curva de decrecimiento resultante.

Para un valor único de los parámetros, se aplica el promediado aritmético para las bandas de octava.

El método por respuesta impulsiva se puede medir de varias maneras (utilizando disparos, impulsos generados por chispazos, barridos sinusoidales o secuencias de longitud máxima como señales (MLS)).

La fuente impulsiva tiene que producir un nivel de presión sonora que garantice un pico suficiente para poder calcular la curva de decrecimiento empezando al menos de 35 dB por encima del ruido de fondo y si queremos calcular el T_{30} al menos tiene que ser 45 dB sobre el ruido de fondo.

Estos tipos de señales de excitación están descritas en el apartado [2.4 RESPUESTA AL IMPULSO](#).

4. ODEON ROOM ACOUSTICS COMO SOFTWARE PARA LA SIMULACIÓN ACÚSTICA

4.1 QUÉ ES ODEON ROOM ACOUSTICS PROGRAM

El software ODEON es desarrollado para simular la acústica del interior de los edificios. Dada la geometría y las propiedades de las superficies, las propiedades acústicas pueden predecirse, ilustrarse y escucharse. ODEON usa el trazado de rayos, está basado en la acústica geométrica [11].

Es una herramienta probada para la predicción de la acústica de los edificios nuevos y para evaluar y recomendar mejoras en los actuales.

La acústica se calcula en función de la geometría de la sala y propiedades de las superficies. Los gráficos, gráficos 3D, y animaciones 3D, hacen que sea fácil interpretar y explorar los resultados, y utilizando la auralización se puede experimentar la acústica del espacio.

Los algoritmos de predicción que utiliza ODEON (método Fuente-Imagen combinado con el trazado de rayos ó Ray-Tracing), permiten predicciones muy fiables en un tiempo moderado.

A través de la simulación acústica de la sala, es posible predecir su respuesta de impulso y sacar valores de los parámetros acústicos como EDT, T_{20} , T_{30} , T_s , SPL, D_{50} , C_{50} , C_{80} , J_{LF} , J_{LFC} , RASTI...

- **Origen de ODEON**

La primera versión de ODEON en 1991 tenía como objetivo la predicción de la acústica del auditorio. Desde entonces, ODEON ha sido continuamente desarrollado y refinado, y ahora está disponible en tres ediciones.

- **Usos**

- Predicción y optimización de la acústica de salas, para la planificación y renovación del interior de los edificios.
- Predicción de la transmisión del sonido a través de paredes o espacios unidos en edificios enteros.
- Predicción de la acústica en las zonas en parte al aire libre, tales como las plazas o estaciones de ferrocarril.
- Predicción y optimización de la interacción entre los sistemas de altavoces y la acústica de salas.
- Imitación del ambiente acústico mediante auralización con auriculares o altavoces.

- **Características**

- Contiene una biblioteca de materiales
- Disponibilidad de muchos medios de visualización de resultados: reflectogramas, reflexiones 3D, mapas 3D y muchos otros medios.
- Se puede crear un modelo rápido usando las herramientas incluidas pero también permite la importación de otros modelos como modelos CAD.
- Permite copiar y exportar los resultados para su posible uso en proyectos.
- Tiempo de cálculo moderado
- Modelización de fenómenos de transmisión y difracción [8].

4.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS FUNCIONES UTILIZADAS, PROCEDIMIENTO Y MÉTODOS DE CÁLCULO

Hemos exportado al software la geometría en 3D de los recintos realizados con google sketchup con los coeficientes de absorción de los diferentes materiales ya ajustados por los grupos del departamento de física de la Universidad Pública de Navarra. Se ha obtenido una estimación del comportamiento acústico de la sala a través de la simulación y para ello se ha configurado los datos de la sala, las distintas fuentes y receptores y los cambios en los coeficientes de absorción de los materiales en el área de la audiencia dependiendo de si necesitábamos condiciones de sala vacía o condiciones de sala llena. Como criterio, todos los receptores se han colocado a 0,4 m sobre el eje z o 1,2 m sobre el suelo y la ganancia de la fuente 31 dB.

Para la asignación de materiales, se ha utilizado la herramienta “Material list”.

- **Material List**

Material List contiene dos listas, una de ellas es una lista con todas las superficies, y la otra contiene todos los materiales de la biblioteca con sus respectivos coeficientes de absorción.

Odeon proporciona una librería de materiales llamada “Material.li8” con una tabla de materiales básicos y sus respectivos coeficientes de absorción. Esta lista puede ser modificada y también se pueden eliminar los materiales que no se vayan a usar, excepto tres materiales especiales que son:

- Material 0, totalmente transparente: Asignar este material a una superficie corresponde a eliminar el efecto de la superficie en todos los cálculos, no ofrece ningún obstáculo a los rayos. Esto puede ser útil para eliminar superficies temporalmente tales como puertas o reflectores dentro de la sala.
- Material 1, totalmente absorbente: Éste material tiene todos los coeficientes de absorción de valor 1, no se refleja ningún rayo, todos son absorbidos por la superficie. Se utiliza para simular aquellas situaciones en las que la fuente se encuentra al aire libre, donde la absorción es muy grande.
- Material 2, totalmente reflectante: Éste material tiene todos los coeficientes de absorción con valor 0, es un material 100% reflexivo, es decir, todos los rayos que chocan con este material son reflejados sin sufrir ni dispersión ni absorción. Se utiliza para definir reflectores en la sala.

También podemos modificar los coeficientes de dispersión y de transparencia de los materiales que añadamos.

- Scattering coefficient (Coeficiente de dispersión): Caracteriza la dispersión propia del material, así como la debida a la geometría de la superficie a la que se le asigna dicho material. Este coeficiente de dispersión representa la rugosidad del material en las frecuencias medias alrededor de 700 Hz. En bajas frecuencias la dispersión está dominada por el fenómeno de la difracción debido al tamaño limitado de las superficies, mientras que en altas frecuencias el efecto dominante son las irregularidades de las superficies.
Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 1 y entre -1 y 0. Aunque se recomienda no utilizar los valores extremos, permaneciendo en el rango 0.1 y 0.7.
Sin embargo, cuando la superficie es muy pequeña y rugosa, puede utilizarse un coeficiente de dispersión negativo para indicar que los rayos que choquen contra esta superficie sean reflejados siguiendo el método “Late Ray”, aunque no se haya alcanzado todavía el orden de reflexión predefinido, en lugar del método “Early Ray”, que no es válido en estas

superficies. Ambos métodos se aplican en la simulación, durante el proceso de trazado de rayos, y tienen en cuenta el valor del coeficiente de dispersión si se selecciona el método de dispersión Lambert durante la configuración de la sala.

- Transparency coefficient (Coeficiente de transparencia): Se asigna a cada superficie, es una manera de hacer que una superficie sea semi-transparente. Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 1; si vale 0 se tienen en cuenta los coeficientes de absorción y si vale 1 dicha superficie no es considerada en los cálculos.

Podemos visualizar en la vista 3D diferentes colores según el material seleccionado. Cada material, según sus coeficientes de absorción, tiene un color diferente al de los demás. La asignación de colores sigue la siguiente regla:

- Rojo: Representa la reflectividad a baja frecuencia.
- Verde: Representa la reflectividad a frecuencias medias.
- Azul: Representa la reflectividad a alta frecuencia.

Esta elección se debe a que los colores rojo, verde y azul son las luces puras cuyas frecuencias están centradas en las bandas de las bajas, medias y altas frecuencias, respectivamente.

Por tanto, observando los colores de la sala con los materiales asignados, sabremos qué superficies absorberán más el sonido y cuáles lo reflejarán. También tendremos información del comportamiento de las superficies a las distintas frecuencias.

A continuación, se muestran los materiales con sus correspondientes coeficientes de absorción utilizados en la zona de la audiencia que hemos cambiado dependiendo de si la simulación es en condiciones de sala llena, o de sala vacía.

		125	250	500	1000	2000	4000
Butaca	Altamente tapizada	0,7	0,76	0,81	0,84	0,84	0,81
Butaca	Altamente tapizada; Ocupada	0,72	0,8	0,86	0,89	0,9	0,9
Butaca	Ligeramente tapizada	0,36	0,47	0,57	0,62	0,62	0,6
Butaca	Ligeramente tapizada; Ocupada	0,51	0,64	0,75	0,8	0,82	0,83

Es importante ajustar algunos parámetros de cálculo en la función “Room Setup”.

- **Room Setup**

El propio programa proporciona valores recomendados de todos ellos pero hay dos que sí que tenemos que modificar.

“Impulse response length” o la longitud de la respuesta de impulso establece el tiempo durante el que se va a calcular la respuesta de la sala, se recomienda que tenga un valor semejante al tiempo real de reverberación de la sala.

En la práctica, lo hemos redondeado al 0.5 más cercano según el tiempo de reverberación obtenido en las medidas experimentales.

“Ray number” o el número de rayos por defecto que nos da Odeon suele ser suficiente, pero si en el modelo hay superficies con fuertes efectos desacopladores o el área de absorción no está uniformemente distribuida tendremos que aumentar su valor.

En la simulación, hemos dejado por defecto el valor de número de rayos, pero en algunos casos en los que los auditorios tenían muchas superficies, gran volumen, o los resultados eran bastante diferentes, hemos aumentado el valor.

Aumentando ambos parámetros el tiempo de cálculo es mayor pero los resultados son más fiables.

En los demás parámetros, como “Number of early scatter rays”, “Transition order”, “Impulse response resolution”, “Scattering method”... se han dejado sus valores por defecto dados por el programa.

Definir las condiciones del medio en el que se va a propagar el sonido, como la temperatura, humedad relativa del aire, y los niveles de ruido de fondo también es posible. Se dejan también, los valores por defecto, ya que no se dispone de especificaciones técnicas en este ámbito en el proceso de medida.

Para calcular el tiempo de reverberación se han utilizado varias funciones en el siguiente orden:

- Quick Estimate Reverberation
- Global Estimate Reverberation
- Calculating point responses, Job List

Aquí se describen dichas funciones y se analizan los distintos métodos que se utilizan en cada una de ellas.

- **Quick Estimate, rápida estimación del Tiempo de Reverberación**

Esta función nos da una idea del orden del valor del parámetro Tiempo de reverberación. Su cálculo es muy útil mientras se está en el proceso de asignar materiales, para la evaluación de estos y su impacto en el total del tiempo de reverberación. También es posible seleccionar cada una de las fuentes definidas. Este método está basado en las fórmulas de la teoría acústica estadística de Sabine, Eyring y Arau-Puchades y como tales se asumen condiciones de campo difuso. Por lo tanto, los resultados dados no deben ser considerados como un resultado concluyente [9].

Hemos utilizado esta función para tener una idea de si el valor del tiempo de reverberación se aproximaba a realidad.

Método de cálculo

Este método calcula el coeficiente de absorción medio, el cual es introducido posteriormente en las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades que estiman del tiempo de reverberación.

En lugar de tomar las áreas de las superficies y multiplicarlas por sus coeficientes de absorción correspondientes para obtener el tiempo de reverberación de la sala, Odeon también envía rayos o partículas a través de la fuente utilizando el método "Late ray reflection" que se describirá posteriormente, reflejándose con direcciones aleatorias y manteniendo una cuenta del número de veces que chocan en cada superficie.

Así, si una superficie no es golpeada por uno de estos rayos, no será incluida en los cálculos. Y cuantas más reflexiones procedan de una superficie, mayor peso tendrá en la media del coeficiente de absorción.

Odeon asume condiciones de campo difuso, es decir, que la distribución del campo sonoro es uniforme en la sala, independientemente de la fuente seleccionada. Esto no es cierto en habitaciones con una absorción desigualmente distribuida o con efectos desacopladores, como corredores conectados o nichos.

Son calculadas dos medidas para la absorción:

- Clásica media de absorción cuyo coeficiente es dado por:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i S_i \alpha_i}{\sum_i S_i}$$

- Modificado media de absorción:

$$\bar{\alpha}' = \frac{\sum_i H_i \alpha_i}{\sum_i H_i}$$

S_i es el área, α_i es el coeficiente de absorción para cada i^{th} superficie.
 H_i es el número de veces que la superficie es golpeada.

Ambos coeficientes se insertan en Odeon en las fórmulas de Sabine y Eyring para así calcular el tiempo de reverberación.

Los valores de la clásica media de absorción son introducidos en Sabine e Eyring. Sólo las superficies que son detectadas aparecen en el sumatorio, por ese motivo el tiempo de reverberación estimado corresponderá a un subvolumen.

La segunda expresión, se utiliza en las expresiones modificadas (Modified Sabine y Modified Eyring). En ella se estima la probabilidad de que cada superficie refleje las partículas durante el trazado de rayos, mediante la obtención de H_i . De este modo, se tiene en cuenta la geometría del modelo y conduce a una mejor aproximación del tiempo de reverberación.

Los coeficientes de absorción medios utilizados para la fórmula Arau-Puchades se calculan de manera similar, excepto que las veces que una superficie es golpeada,

área, y los correspondientes valores medios de los coeficientes de absorción, se calculan como proyecciones de cada uno de los ejes principales de la habitación.

En ambos casos, se utiliza como valor del volumen, el calculado a partir de la expresión:

$$l = \frac{4V}{S}$$

V: Volumen total de la habitación

S: Área total de las superficies. Se calcula como la suma de las áreas de las superficies detectadas durante el trazado de rayos.

l: Camino libre medio. Es el promedio de la distancia recorrida por los rayos sonoros entre reflexiones consecutivas. Depende de la forma de la habitación y de la distribución de las direcciones seguidas por las reflexiones.

Esta aproximación del volumen es bastante aceptable, excepto en aquellas situaciones en las que hay muchas superficies (Reflectores, ventanas...) definidas sobre las paredes limítrofes o hay superficies que quedan fuera de la habitación; o bien, cuando hay paredes que tienen ambos lados expuestos a la habitación. En el primer caso, supondrá una subestimación, y en el segundo, una sobreestimación.

- **Global Estimate, un método fiable para la estimación del Tiempo de Reverberación.**

Este método calcula los tiempos de reverberación T_{30} y T_{20} utilizando el método propuesto por Schröder, el volumen de la sala, el camino libre medio y genera estimaciones de curvas de caída. Los rayos son enviados desde la fuente en direcciones aleatorias y se reflejan mediante el método de reflexión "Late ray". Odeon registra la pérdida de energía en cada rayo como una función del tiempo que ocurre debido a la absorción en las superficies de las habitaciones y en el aire.

Con esto iniciamos el cálculo de la respuesta global de la sala para una fuente dada. Cuando la curva está estable, paramos el proceso de cálculo mediante el botón "Derive results".

Los resultados que obtenemos son: "Energy Curves", "Estimated Reverberation Times" y "Free Path Distribution".

- Energy curves: Representa la variación temporal de la fuente sonora después de que la fuente seleccionada deje de emitir. Hay una curva para cada frecuencia.

- **Estimated Reverberation Times:** Es un diagrama de barras en el que se visualizan los tiempos de reverberación T_{20} y T_{30} , para cada banda de frecuencia.
A menudo los valores del T_{30} son mayores que los del T_{20} , si es al revés, el número de rayos utilizado en la simulación podría ser insuficiente, tendremos que repetir la simulación (Recalculate button) con mayor número de rayos.
Si alguno de estos valores fuese nulo tendremos que recalcular aumentando la longitud de la respuesta impulsional ("Impulse Response Length").
- **Free Path Distribution:** Es una curva que contiene la distribución de la longitud de la trayectoria trazada por los rayos antes de chocar con alguna pared, durante el proceso de "Ray Tracing".

Los resultados del tiempo de reverberación difieren de los valores dados por el método "Quick Estimated" porque la forma de la sala y la posición de los materiales absorbentes son tenidos en cuenta [9].

Éste es un método más preciso porque no emplea ninguna hipótesis sobre condiciones de campo difuso, por lo tanto, es un método más fiable para la estimación del tiempo global de reverberación. Está basado en el trazado de rayos (ray-tracing).

En auditorios el valor del tiempo de reverberación puede ser más corto que el valor dado por el método "Quick Estimated" ya que el área dominante de absorción se encuentra en la zona de la audiencia, próxima a la fuente.

Si no se adjunta un esquema de fuente y receptores, los valores del tiempo de reverberación son sacados con la función Global Estimate dado que es un método más fiable.

Método de cálculo

Calcula los parámetros T , T_{20} y T_{30} a partir de la curva de decaimiento energético global.

La adquisición de dicha curva comienza por emitir partículas desde la fuente escogida y reflejarlas en las paredes de la sala según el método "Late ray reflection". A medida que estos rayos avanzan por la habitación, sufren pérdidas de energía debidas a los coeficientes de absorción de las paredes con las que chocan y a la absorción del aire, particularmente importante en altas frecuencias.

La propagación de estos rayos finaliza cuando se alcanza la longitud de la respuesta impulsional o el orden de reflexión máximo, que son dos parámetros de configuración definidos en la ventana "Room Setup".

Sin embargo, se seguirán lanzando partículas desde la fuente hasta que detengamos el proceso. En ese momento, las contribuciones de todos los rayos son sumadas en función del tiempo.

Cuanto más tardemos en interrumpir la simulación, mayor será el sumatorio y mejor será la aproximación de la curva energía-tiempo. Siendo 35 dB, la mínima caída necesaria para obtener los parámetros acústicos T_{30} y T_{20} .

- **Point Response Calculations, Job List**

No sólo se estima el tiempo de reverberación T , también otros parámetros acústicos como la Claridad, Definición, SPL, SPL_A , STI, J_{LF} ...

Con esta utilidad podemos definir trabajos o simulaciones distintas. Aquí es posible seleccionar las fuentes que estarán activas, la orientación, en nuestro caso todos los receptores estarán orientados hacia la emisión de la fuente, y la señal sonora que emitirán.

Utilizamos esta función para determinar parámetros acústicos en los casos en los que previamente nos dan esquema de fuente y receptores, si no es así y nos dan solamente información acerca del número, se colocan aleatoriamente intentando que estén en posiciones equidistantes.

Hay tres posibles cálculos:

- **Single Point response**: Ofrece con detalles los resultados de los parámetros acústicos de la sala, respuesta impulsional de la sala, reflectograma y auralización para un receptor seleccionado, y sólo son posibles estos cálculos para un único receptor.

Con el reflectograma podemos visualizar y localizar reflexiones particulares y esto puede ser útil, por ejemplo, para la localización de problemas de eco. Este método es el más detallado.

Para la visualización de datos tenemos una serie de ventanas: "Room acoustical parameters", "Energy curves", "Decay curves", "Reflectogram", "Reflection density", "3D Reflection paths", "Binaural room impulse response BRIR".

A continuación describimos lo que hemos utilizado:

- "Room acoustical parameters": Seleccionando el parámetro acústico deseado podemos visualizar un diagrama de barras con las ocho bandas frecuenciales.
- "Decay Curves": Son las curvas de decaimiento energético, que representan la evolución temporal del nivel de energía sonora (SPL), para las 8 bandas de frecuencia.
- "3D Reflection paths": Es un visualizador de las trayectorias trazadas por las primeras reflexiones que llegan al receptor procedentes de la fuente puntual que está activa.
- "Reflectogram": Sólo se utiliza para fuentes puntuales y no contiene ninguna información relevante acerca de las fuentes en línea. Si "transition order" se pone a cero en "Room Setup", entonces el reflectograma contiene sólo una reflexión, el sonido directo.

- **Multi Point response**: Ofrece los valores de los parámetros acústicos de todos los receptores definidos en la sala. Éstos están previamente definidos en "Receiver list".

Podemos visualizar los resultados a través de las siguientes gráficas: "Energy parameter curves", "Parameter versus distance", "Statistics", "Spatial decay curves", "Energy parameters", "3D sources and receivers".

- "Energy parameter curves": Dos curvas de los parámetros energéticos. Una de ellas muestra el parámetro seleccionado, independiente de la frecuencia y la otra dependiente de la frecuencia.
 - "Statistics": Obtiene el valor máximo, mínimo y medio para un parámetro dado.
 - "Energy Parameters": Una recopilación de todos los valores de los parámetros calculados para cada uno de los receptores.
 - "3D sources and receivers": Esquema en 3D con las fuentes activas y los receptores de la sala. Se puede ver rápidamente que fuentes están activas en un trabajo seleccionado mediante este esquema.
-
- **Grid response**: Calcula los parámetros acústicos de la sala para un área receptora. Las superficies sobre las que se debe calcular la cuadrícula o rejilla se seleccionan en "Define Grid".
Con esto se obtiene un mapa de color, y se calculan los parámetros acústicos para todas las bandas frecuenciales en esas zonas previamente definidas.
Se pueden definir cuadrículas tan densas como se quiera pero esto nos conducirá a tiempos de cálculo más grandes.
En la opción "Densidad de reflexiones tardías" se recomienda 10 reflexiones/ms para obtener resultados fiables en relación calidad-tiempo.
Una vez introducido todos los parámetros, seleccionando un receptor, podemos ver simultáneamente los mapas de color de todos los parámetros acústicos en sus frecuencias.

En nuestro caso, en la opción "Define grid", dependiendo del auditorio la distancia entre receptores se ha fijado en 2 m, 2'5 m y 3 m.

Método de cálculo

El cálculo lo podemos dividir en dos partes.

- 1- Se trazan los rayos emitidos por la fuente o fuentes activas y se estiman todas las reflexiones que se generan al chocar los rayos con las distintas superficies. Esta parte es independiente de los receptores definidos.

El criterio de parada es el orden de reflexión, fijado en el parámetro "Max. Reflection Order" o la longitud del camino recorrido por el rayo, limitado por "Impulse Response Length".

Después de haber trazado los rayos en el interior del espacio, se almacenan los datos en un fichero de historial de rayos con puntos y ángulos de incidencia, longitud del camino recorrido del rayo, orden de reflexión...

- 2- El siguiente paso es evaluar para cada receptor que rayos contribuyen a la curva de decaimiento energético global. En caso de que haya varias fuentes activas, el resultado de cada receptor será la suma de todas las contribuciones procedentes de cada fuente. A partir de dicha curva se estiman todos los parámetros acústicos y todas las gráficas disponibles en Odeón.

Con las fuentes puntuales el método adoptado es híbrido, es decir, combina los métodos "Early Ray Reflection" y "Late Ray Reflection". Mientras que con las fuentes lineales y superficiales se aplica sólo el método "Late Ray Reflection".

MÉTODO EARLY RAY REFLECTION

Este método es usado para obtener las primeras reflexiones de las fuentes puntuales. Dentro de esta categoría, entran todos los rayos cuyo orden de reflexión es menor o igual al orden de transición definido en el "Room Setup".

Inicialmente, la fuente puntual emite rayos en todas las direcciones de forma que el primer rayo es lanzado verticalmente hacia abajo y el último hacia arriba, consiguiendo que la distribución final sea uniforme.

Cuando uno de estos rayos impacta con una superficie del modelo, se calcula su fuente imagen correspondiente. Ésta queda definida por el ángulo de incidencia y la longitud del trayecto del rayo incidente.

Cada fuente imagen contribuye con un rayo reflejado según la ley de Snell y con un árbol de dispersión.

Éste es simulado como un conjunto de fuentes secundarias distribuidas sobre la superficie que originó la fuente imagen, emitiendo tantos rayos como indique el producto del coeficiente de dispersión de la superficie por el parámetro "Number of early scatter rays". Cada uno de estos rayos genera a su vez otra fuente secundaria cuando choca con otra superficie. Por ello, para poner fin a este proceso, se trazan sólo los rayos desde el orden de reflexión inicial (el orden que tiene el rayo que originó la fuente imagen) hasta el orden de transición ("Transition order" en "Room Setup").

Los rayos generados por una fuente imagen tienen una atenuación que tiene en cuenta:

- La directividad de la fuente primaria en la dirección correspondiente de radicación.

- Los coeficientes de reflexión de la superficie involucrados en generar la imagen.
- La absorción del aire.
- La atenuación con la distancia recorrida desde la fuente hasta el receptor.
- Las pérdidas de difracción debidas al tamaño limitado de las superficies.
- Las pérdidas de dispersión, que tienen en cuenta el orden del rayo reflejado. Así, si el coeficiente de dispersión es α , la energía especular será multiplicada por un factor $(1 - \alpha)$ para un rayo de primer orden de reflexión, por $(1 - \alpha)^2$ si es de segundo orden, etc.

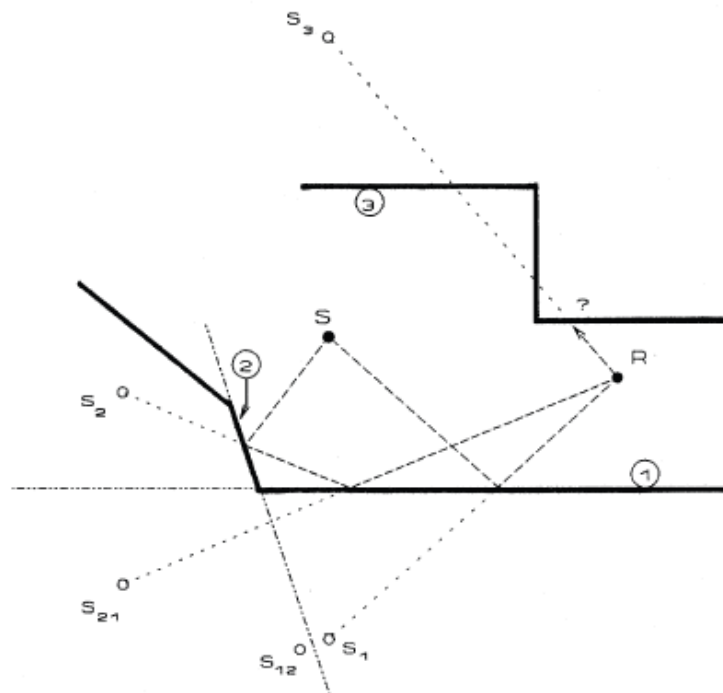


Fig. 22 Fuentes visibles y no visibles.

Algunas fuente imagen pueden estar no visibles debido a que las paredes de la sala bloquean el camino reflejado. Las fuente imagen visibles son las que no encuentran paredes ni ningún obstáculo interfiriendo el trayecto de sus rayos hasta el receptor y además el receptor cae dentro del ángulo de apertura formado por el rayo reflejado y la superficie de choque.

Si nos fijamos en la Fig. 22, tenemos una fuente (S) y un receptor (R). S_1 , S_2 , S_3 , S_{12} y S_{21} son las fuente imagen. Se crean cuando un rayo choca con una de las superficies y su posición queda determinada por el ángulo de incidencia y la longitud del camino trazado por el rayo desde la fuente hasta el punto de colisión con la superficie.

Se pueden observar rayos directos, primeras reflexiones y reflexiones de segundo orden.

Observamos que S_1 y S_{21} son visibles para el receptor R. Vemos que para S_3 hay una pared en la trayectoria del rayo reflejado, por lo tanto no es visible para R. Y para S_2 tampoco cumple las condiciones, es de orden 2 y por ello tampoco es visible.



MÉTODO LATE RAY REFLECTION

Todas las reflexiones que no son tratadas por el método "Early ray reflection" son tratadas por este método. Se aplica para fuentes lineales, pero también se aplica para los rayos en fuentes puntuales en el caso de que el orden de reflexión esté por encima del valor fijado en "Transmission order" en "Room Setup" que representan las reflexiones tardías o cola reverberante.

En ambas situaciones, cada vez que un rayo choca contra una superficie de la sala, se crea en el punto de impacto una fuente secundaria. Esta fuente emite un rayo en una dirección que varía según esté activo o no el método de dispersión Lambert en "Room Setup". Si no está activo, el rayo emitido cumplirá la ley de Snell. Pero si se utiliza la dispersión de Lambert, la dirección del nuevo rayo se calcula teniendo en cuenta el coeficiente de dispersión de la superficie.

Por ejemplo, si el coeficiente de dispersión vale 0.7, la energía del nuevo rayo se distribuye en dos componentes: un 30% constituye la componente según la dirección especular y el 70% restante sigue la dirección de dispersión según la distribución de Lambert, es decir, la energía dispersada es proporcional a $\cos\theta$. Si el coeficiente vale 0, toda la energía será reflejada y si vale 1, será sólo dispersada según la ley de Lambert para dispersiones ideales.

Al terminar, Odeon comprueba que fuentes secundarias son visibles desde el receptor, descartando las que no lo son. Y aplica a cada nuevo rayo una atenuación debida a los siguientes factores:

- La directividad de la fuente primaria.
- El factor de directividad de las fuentes secundarias $4\cos\theta$, según la ley de Lambert.
- Los coeficientes de reflexión de la superficie que la generó. Se consideran también las componentes angulares si la opción "Angular Absorption" está activa en "Room Setup".
- La absorción del aire.
- La atenuación con la distancia recorrida desde la fuente primaria hasta el receptor.

Como consecuencia, con un número no muy grande de rayos emitidos se consigue un número aceptable de reflexiones en el receptor, pudiendo obtener resultados estadísticamente fiables [10].

5. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS AUDITORIOS ANALIZADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

5.1.1 RECINTOS ESTUDIADOS

En el proceso de elección de recintos a estudiar, para su posterior comparación de resultados con “Odeon room acoustics program” se han escogido 16 salas de gran tamaño con un aforo de más de 1000 plazas, situadas todas ellas en el territorio español. Suponen el 21% del total de los recintos cubiertos con estas características.



Fig. 23 Mapa situación recintos españoles estudiados

La siguiente tabla muestra las salas estudiadas, las fechas de construcción original e inauguración, y si corresponde según el caso, las fechas de rehabilitación.

	Nº	Cód.	Sala. Provincia	Arquitecto/s	Const.	Rehab.
A	1	002	Auditorio Nacional de Música. Madrid	José María García de Paredes	1988	
B	2	003	Gran teatre del Liceu. Barcelona	Miguel garriga i Roca Josep Oriol Mestres Ignasi de Solà-Morales	1847	1999
C	3	005	Palacio Euskalduna de congresos y de la música. Bilbao	Federico Soriano Dolores Palacios	1999	
D	4	007	Palacio de congresos Príncipe Felipe. Oviedo	Rafael Beca	1999	
E	5	009	Sala Mozart. Zaragoza	José Manuel Pérez	1994	
F	6	012	Centro Kursaal. San Sebastián	Rafael Moneo	1999	
G	7	017	Auditorio Alfredo Kraus. Las Palmas de Gran Canaria.	Óscar Tusquets	1998	
H	8	021	Baluarte, palacio de congresos y auditorio de Navarra. Pamplona	Francisco Mangado	2003	
I	9	033	Auditorio Manuel de Falla. Granada	José María García de Paredes	1978	
J	10	039	Gran Teatro Falla. Cádiz	Adolfo Morales de los Ríos García del Álamo Juan Cabrera de la Torre	1871	1910
K	11	040	Teatro Romea. Murcia	Hellinero justo Millán	1862	1880 1988 2012
L	12	043	Teatro Villamarta. Jerez de la Frontera	Teodoro Anasagasti	1926	
M	13	045	Auditorio Ciudad de León. León	Hemilio Tuñón Luis Moreno	2001	
N	14	056	Teatro Gayarre. Pamplona	Javier Yarnoz	1841	1932
O	15	057	Teatro Miguel de Cervantes. Málaga	Jerónimo Cuervo	1870	
P	16	069	Sala Buero Vallejo. Guadalajara	Luis Rojo de Castro Begoña Fernández-Shaw Ángel Verdasco Novalvos	2002	

5.1.2 METODOLOGÍA ANÁLISIS ACÚSTICO

El estudio se ha realizado mediante una recopilación de valores de las medidas experimentales realizadas in situ y la utilización de las técnicas de simulación mediante ordenador (software Odeon), para conocer y predecir el comportamiento acústico de recintos. Los valores de estas medidas se encuentran en los enlaces dados en las fichas individuales.

Describimos el proceso en las siguientes fases:

- Búsqueda de datos generales y recopilación de modelos 3D.
- Búsqueda de valores de parámetros correspondientes a las mediciones acústicas.
- Elaboración de tablas de datos.

- Análisis y valoración individual de las condiciones acústicas de cada recinto según sus parámetros acústicos obtenidos tras las medidas experimentales. Este análisis se encuentra en el apartado 7. Análisis comparativo y exposición de datos.

Además de los parámetros acústicos evaluados mediante las medidas experimentales in situ, mediante la simulación acústica con Odeon se han obtenido los siguientes descritos en el apartado 2.6:

- Tiempo de reverberación (TR_{mid})
- Calidez (BR)
- Brillo (br)
- Tiempo de caída inicial (EDT)
- Claridad de la voz (C_{50})
- Claridad musical (C_{80})
- Eficiencia lateral (J_{LF} y J_{LFC})
- STI/RASTI

En la siguiente tabla encontramos la formulación utilizada en el cálculo de parámetros acústicos:

Parametro	Formulas
Reverberation Time (TR_{10}):	$TR_{mid} = \frac{1}{2} (TR^{500\text{ Hz}} + TR^{1\text{ kHz}})$
Bass Ratio	$BR = \frac{TR^{125\text{ Hz}} + TR^{250\text{ Hz}}}{TR^{500\text{ Hz}} + TR^{1\text{ kHz}}}$
Brilliance:	$Br = \frac{TR^{2\text{ kHz}} + TR^{4\text{ kHz}}}{TR^{500\text{ Hz}} + TR^{1\text{ kHz}}}$
Early Decay Time	$EDT_{mid} = \frac{1}{2} (EDT^{500\text{ Hz}} + EDT^{1\text{ kHz}})$
Initial Time Delay Gap	ITDG
Center Time:	$T_C = T_{C1\text{ kHz}}$
Music Clarity:	$C_{80} = \frac{1}{3} (C_{80}^{500\text{ Hz}} + C_{80}^{1\text{ kHz}} + C_{80}^{2\text{ kHz}})$
Speech Clarity:	$C_{50} = 0.15 \cdot C_{50}^{500\text{ Hz}} + 0.25 \cdot C_{50}^{1\text{ kHz}} + 0.35 \cdot C_{50}^{2\text{ kHz}} + 0.25 \cdot C_{50}^{4\text{ kHz}}$
Speech Parameters	STI, RASTI, %Alcons
Strenght:	$G_{mid} = \frac{1}{2} (G^{500\text{ Hz}} + G^{1\text{ kHz}})$
Lateral Strenght;	$LG_{E4} = \frac{1}{4} (LG_E^{125\text{ Hz}} + LG_E^{250\text{ Hz}} + LG_E^{500\text{ Hz}} + LG_E^{1000\text{ Hz}})$
Lateral Efficiency:	$\begin{cases} LF_4 = \frac{1}{4} (LF^{125\text{ Hz}} + LF^{250\text{ Hz}} + LF^{500\text{ Hz}} + LF^{1\text{ kHz}}) \\ LFC_4 = \frac{1}{4} (LFC^{125\text{ Hz}} + LFC^{250\text{ Hz}} + LFC^{500\text{ Hz}} + LFC^{1\text{ kHz}}) \end{cases}$

Fig. 24 Resumen parámetros acústicos y fórmulas

Se han realizado las siguientes fichas descriptivas en las que se incluyen los siguientes aspectos:

1) DESCRIPCIÓN GENERAL

- Capacidad: Aforo del auditorio.
- Volumen de la sala: Extensión en tres dimensiones de una región del espacio, expresada en m^3 .
- Dimensiones de la sala: Altura (H), anchura (W) y longitud (L).
- Descripción: Descripción general de la historia de la sala.
- Fotografías: Documentación fotográfica actual de la sala.
- Enlaces: Enlaces a sitios web dónde se encuentran los valores de las medidas experimentales.
- Materiales asignados: Se indican los materiales para cada recinto en particular y los coeficientes de difusión.

2) PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

- Condiciones de la sala: Sala vacía o sala ocupada, según en que condiciones se han realizado las mediciones basándose en la norma internacional ISO 3382-1.
- Receptores: Número y posición de receptores.
- Fuente: Número y posición.
- Señal emitida: Tipo de señal de excitación empleado, señales aleatorias, señales pseudoimpulsivas, señales pseudoaleatorias como MLS, sweeps... todas ellas descritas en el apartado 2.4.

3) PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- Condiciones de la sala: Las mismas condiciones de sala que en el procedimiento experimental de medida.
- Receptores: El mismo número de receptores que en el proceso experimental de medida. Si no disponemos de posición exacta pero sí de esquema de fuente y receptores, se colocarán con la máxima exactitud posible. Si no disponemos de posición exacta ni de esquema de receptores, se colocarán al azar equidistantes o aleatoriamente.
- Fuente: La misma posición que en el proceso experimental de medida. Si no se especifica se colocará en el centro del escenario.

4) ESQUEMA FUENTE Y RECEPTORES

Es un esquema de la posición de la fuente y receptores en el área de la audiencia. Aparecen en algunos casos dos esquemas, uno referente al proceso experimental de medida y otro al proceso de simulación acústica con ODEON. En otros casos sólo este último.

5) RESULTADOS POR PARÁMETROS

Tablas de resultados de los parámetros medidos y simulados, en caso de disponer de los parámetros medidos en las diferentes frecuencias se dará también una gráfica.

6) PLANOS

Planos de los recintos.

5.1.3 MATERIALES ASIGNADOS

La absorción del sonido es diferente dependiendo de la frecuencia y del tipo de material. Cada modelo geométrico importado a ODEON de los diferentes recintos tiene asignados los siguientes materiales y sus respectivos coeficientes de absorción.

La asignación se realizó tras la visualización de fotografías, queriendo reproducir la posible toma de decisiones sobre revestimientos en la fase de diseño de un auditorio.

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	125	250	500	1K	2K	4K	REFERENCIA
MADERA [1]	Panel de madera contrachapada	0,42	0,21	0,1	0,08	0,06	0,06	Vorlander (Thin plywood panelling)
MADERA [2]	1 capa	0,25	0,18	0,11	0,08	0,07	0,06	Beranek (Wood, sidewalls, 1 layer, 20 mm w/doors & lighting)
MADERA [3]	Madera 1,6 cm sobre listones	0,18	0,12	0,1	0,09	0,09	0,07	Vorlander (Wood 1.6 cm thick, on 4 cm wooden planks)
MADERA [4]	Suelo escenario	0,1	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	Beranek y Vorlander (Wood, stage floor, 2 layers, 27 mm over airspace)
BUTACA [5]	Altamente tapizada	0,7	0,76	0,81	0,84	0,84	0,81	beranek (Seats unoccupied, Heavily upholstered)
BUTACA [6]	Altamente tapizada; Ocupada	0,72	0,8	0,86	0,89	0,9	0,9	beranek (audience, seats fully occupied, Heavily upholstered)
BUTACA [7]	Ligeramente tapizada	0,36	0,47	0,57	0,62	0,62	0,6	Beranek (Lightly upholstered)
BUTACA [8]	Ligeramente tapizada; Ocupada	0,51	0,64	0,75	0,8	0,82	0,83	Beranek (Audience, seats fully occupied, Lightly upholstered)
YESO [9]	Superficie dura	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	Vorlander (Walls, hard surfaces average)

								plaster, hard floors, etc.)
YESO [10]	Pladur	0,15	0,1	0,06	0,04	0,04	0,05	Vorlander (2 + 13 mm plasterboard on steel frame, 50 mm mineral wool in cavity, surface painted)
CORTINAS [11]	Pesada, plegada a 13 cm pared	0,3	0,45	0,65	0,56	0,59	0,71	Vorlander (Cotton curtains (0.5 kg/m ²) draped to 3/4 area approx. 130 mm from wall)
CORTINAS [12]	Ligera, colgada 9 cm pared	0,05	0,06	0,39	0,63	0,7	0,73	Vorlander (Curtains (0.2 kg/m ²) hung 90 mm from wall)
CORTINAS [13]	Ligera 5 cm pared	0,03	0,03	0,15	0,4	0,5	0,5	Vorlander(Curtains of close-woven glass mat hung 50 mm from wall)
VIDRIERA [14]	Vidriera	0,3	0,2	0,14	0,1	0,05	0,05	Vorlander (Lead glazing)
LINÓLEO [15]	Linóleo	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	Beranek y Vorlander (Concrete floor, linoleum cemented to it)
ALFOMBRA MOQUETA [16]	Alfombra algodón	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54	Vorlander (cotton carpet)
ALFOMBRA MOQUETA [17]	Delgada sobre hormigón	0,02	0,04	0,08	0,2	0,35	0,4	Vorlander (Thin carpet, cemented to concrete)
NUEVA MADERA [18]	Nueva madera clara (escenario, fondo)	0,21	0,15	0,10	0,07	0,06	0,03	

Tabla 1 Descripción de Materiales y coeficientes de absorción por frecuencias



5.2 ANÁLISIS INDIVIDUAL: FICHAS

	<u>Pág.</u>
1. Auditorio Nacional de Música. Madrid _____	60
2. Gran Teatre del Liceu. Barcelona _____	63
3. Palacio Euskalduna de congresos y de la música. Bilbao _____	66
4. Palacio de congresos Príncipe Felipe. Oviedo _____	69
5. Sala Mozart. Auditorio y palacio de congresos. Zaragoza _____	72
6. Auditorio Centro Kursaal. San Sebastián _____	79
7. Auditorio Alfredo Kraus. Las Palmas de Gran Canaria _____	82
8. Baluarte. Auditorio y palacio de congresos de Navarra. Pamplona _____	85
9. Auditorio Manuel de Falla. Granada _____	89
10. Gran Teatro Falla. Cádiz _____	94
11. Teatro Romea. Murcia _____	99
12. Teatro Villamarta. Jerez de la Frontera _____	102
13. Auditorio Ciudad de León. León _____	107
14. Teatro Gayarre. Pamplona _____	110
15. Teatro Miguel de Cervantes. Málaga _____	114
16. Sala Buero Vallejo. Guadalajara _____	119

5.2.1 AUDITORIO NACIONAL DE MÚSICA - MADRID

CÓDIGO	002
DESCRIPCIÓN	
<p>El Auditorio Nacional de Música es una sala de conciertos situada en Madrid, dedicada preferentemente a conciertos de música clásica.</p> <p>Obra del arquitecto José María García de Paredes, fue inaugurado el 21 de octubre de 1988. Posee dos salas de conciertos, Sinfónica y de Cámara, con una capacidad de 2.324 y 692 localidades respectivamente.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 	
[Fotografía 1- Interior de la sala sinfónica del Auditorio Nacional]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Caceres11_AS003.pdf CD:/Anexo1_ValoresExperimentales/Nº1_AuditorioNacionalMusicaMadrid	

Datos Técnicos		Dimensiones de la sala	
Capacidad	2324 localidades	Altura (H)	65,4 m
Volumen sala	22.000 m ³	Anchura (W)	31,1 m
Superficie audiencia	1777 m ²	Longitud (L)	28 m
Superficie escenario	146 m ²		

Superficie	Material	Coficiente de Difusión
Suelo	[4]	0,05
Pared	[9]	0,05
Audiencia	[5]	0,7
Techo	[1]	0,05

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía y escenario sin músicos.
- **RECEPTORES:** Los receptores se colocaron en 52 posiciones de recepción, a una altura de 1,2 m.
- **FUENTE:** Centrada en el escenario a 5 m del borde de éste.
- **SEÑAL EMITIDA:** Ruido rosa.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía y escenario sin músicos.
- **RECEPTORES:** Los receptores se colocaron en 52 posiciones de recepción. Al azar equidistantes.
- **FUENTE:** Centrada en el escenario a 5 m del borde de éste.

ESQUEMAS FUENTE Y RECEPTORES

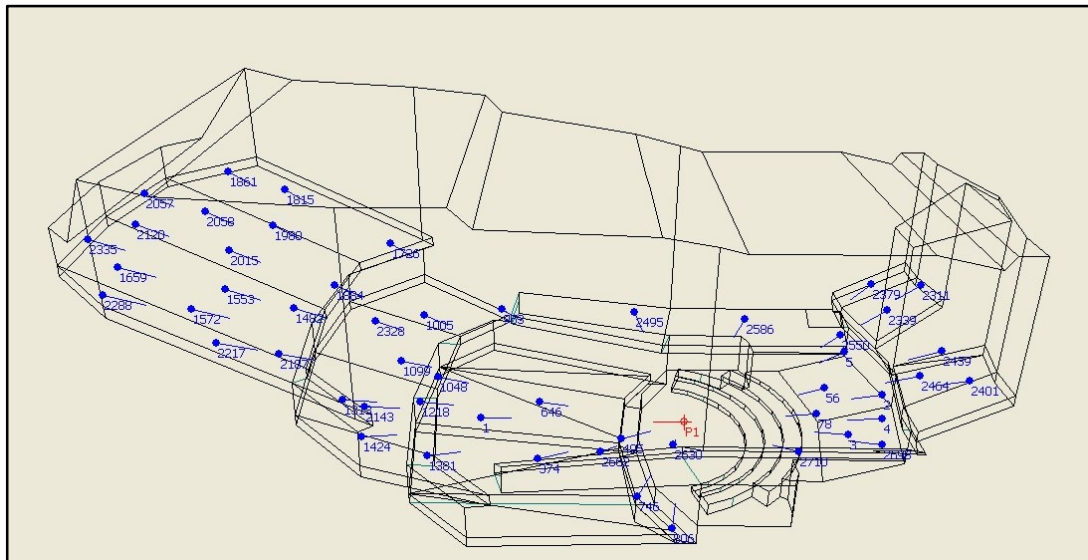
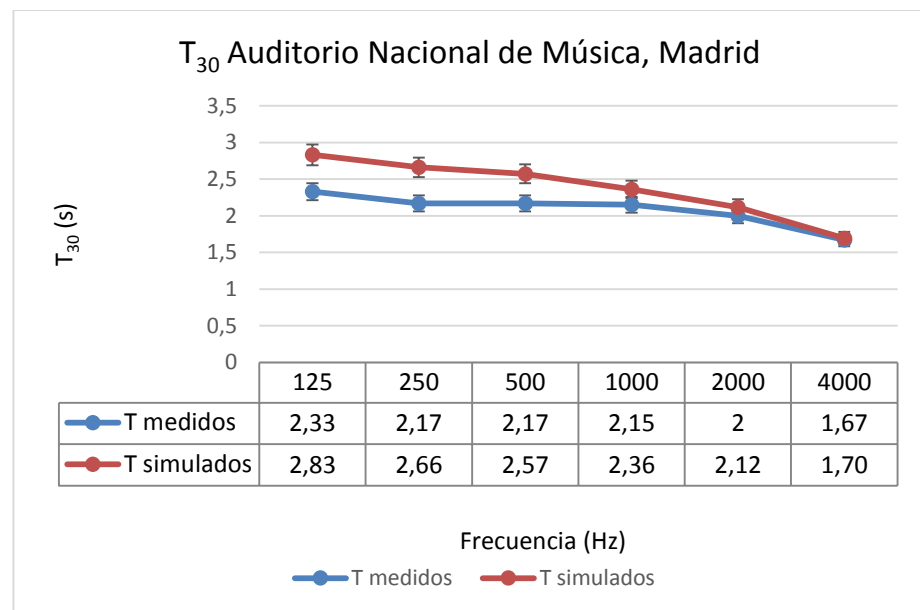


Fig. 25 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia ODEON

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	2,16	2,48
Índice de Calidez (s)	1,04	1,11
Índice de Brillo (s)	0,85	0,77
EDT (s)	2,02	2,39
Claridad musical C_{80}	1	-0,1



Gráfica 1 Tiempos de reverberación por frecuencias

PLANOS

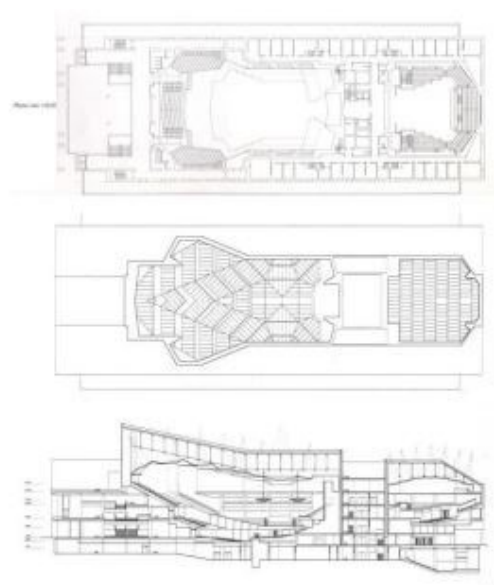


Fig. 26 Planos Auditorio Nacional; planta y sección longitudinal.

5.2.2 GRAN TEATRE DEL LICEU - BARCELONA

CÓDIGO	003
DESCRIPCIÓN	
<p>Esta sala fue y será la sede de la ópera de Barcelona, y es una de las más famosas, hermosas y prestigiosas salas de ópera del mundo.</p> <p>Ha sido escenario, desde 1847, de las más prestigiosas obras, interpretadas por los mejores cantantes del mundo.</p> <p>Sus arquitectos son Miguel Garriga i Roca en 1847 desde su apertura, Josep Oriol Mestres en 1862 después del incendio del Liceo e Ignasi de Solà-Morales en 1999 tras la rehabilitación.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 	
[Fotografía 2- Gran Teatre del Liceu. Interior-exterior.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/publicaciones_4355fw035.pdf CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/Nº2_GranTeatroLiceoBarcelona	

Datos Técnicos	
Capacidad	2300 localidades
Volumen sala	13.423 m ³
Superficie audiencia	1390 m ²
Superficie escenario	198 m ²

Dimensiones de la sala	
Altura (H)	37,08 m
Anchura (W)	23,82 m
Longitud (L)	18,36 m

Superficie	Material	Coefficiente de Difusión
Suelo	[9]	0,05
Barandilla	[9]	0,3
Pared	[17]	0,05
Audiencia	[5] y [6]*	0,7
Techo	[9]	0,3
Escenario	[13]	0,05

*Simulación para sala ocupada (Se realizaron dos simulaciones).

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Sala vacía y sala llena. Dependiendo que parámetro tenemos los valores para una condición de sala u otra.
Parámetros:
I Sala vacía. Calidez y Brillo Sala Llena. EDT Sala vacía. C₈₀ Sala vacía. STI/RASTI Sala vacía. Sonoridad G Sala vacía.
- **RECEPTORES:** Mediciones en 27 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** La fuente sonora fue colocada en dos puntos. Escenario y Foso. Estudiaremos la fuente colocada en el escenario.
- **SEÑAL EMITIDA:** Ruido rosa.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Sala vacía y sala llena, dependiendo el parámetro a estudiar.
Parámetros:
I Sala vacía. Calidez y Brillo Sala Llena. EDT Sala vacía. C₈₀ Sala vacía. STI/RASTI Sala vacía. Sonoridad G Sala vacía.
- **RECEPTORES:** Situados en 27 posiciones de la sala colocadas aleatoriamente.
- **FUENTE:** La fuente sonora colocada en el escenario.

ESQUEMAS FUENTE Y RECEPTORES

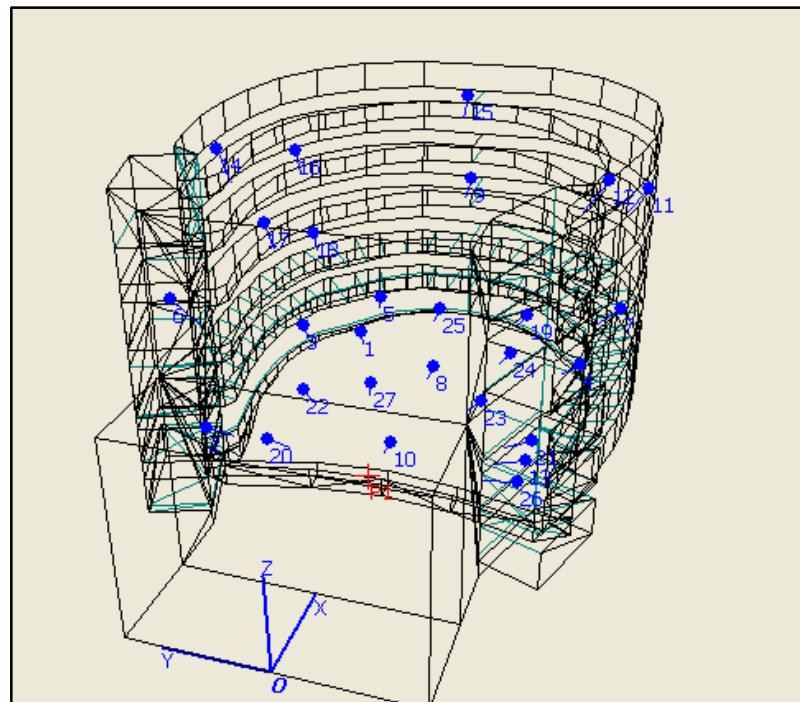
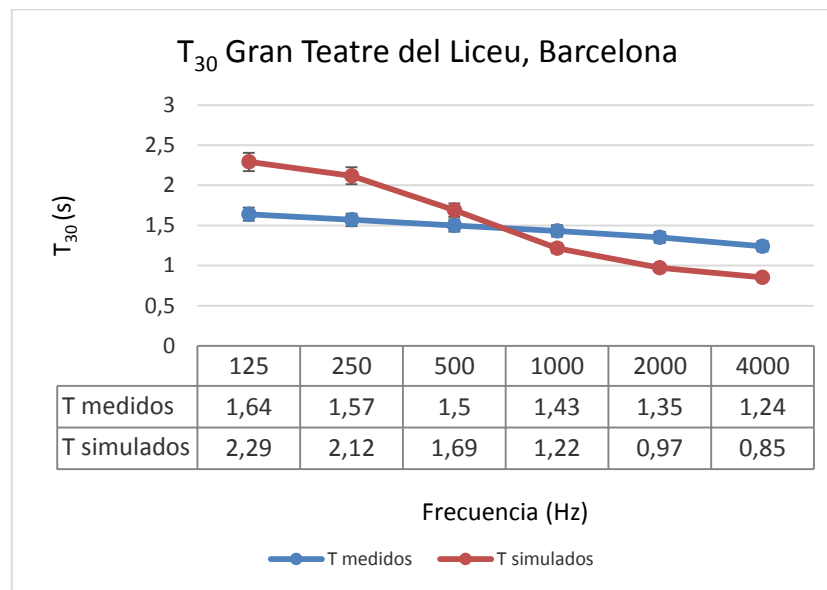


Fig. 27 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia ODEON

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	1,47	1,45
Índice de Calidez (s)	1,10	1,52
Índice de Brillo (s)	0,88	0,63
EDT (s)	1,16	1,32
Claridad musical C_{80}	4,1	3,55



Gráfica 2 Tiempos de reverberación por frecuencias

PLANOS

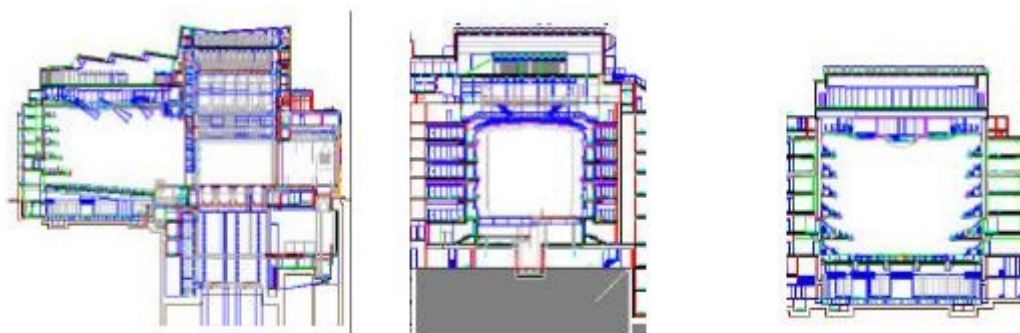


Fig. 28 Secciones longitudinal y transversales del Gran Teatre Lírico del Liceo de Barcelona

5.2.3 AUDITORIO - PALACIO EUSKALDUNA DE CONGRESOS Y DE LA MÚSICA - BILBAO

CÓDIGO	005
DESCRIPCIÓN	
<p>Inaugurado el 19 de febrero de 1999, el Palacio de Congresos y de la Música Euskalduna Jauregia es un edificio muy singular; uno de los buques insignia del nuevo Bilbao del siglo XXI.</p> <p>Concebido por sus arquitectos, Federico Soriano y Dolores Palacios, como un buque en permanente construcción, emergiendo de un dique en el que estuvo situado el astillero Euskalduna, el Palacio obtuvo el Premio Enric Miralles 2001 en la VI Bienal de la Arquitectura Española.</p> <p>En él se desarrolla la Temporada de Ópera de la ABAO, una de las más importantes y prestigiosas de todo el Estado y de Europa, y tiene también su sede la Bilbao Orkestra Sinfonikoa, una magnífica institución musical que dio su primer concierto en 1922.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 	
[Fotografía 3- El Palacio Euskalduna.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Sevilla02_rba01005.pdf CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/Nº3_PalacioEuskaldunaBilbao	

Datos Técnicos	
Capacidad	2.165 localidades
Volumen sala	29.271 m ³
Superficie audiencia	1631 m ²
Superficie escenario	319 m ²

Dimensiones de la sala	
Altura (H)	60,9 m
Anchura (W)	33,8 m
Longitud (L)	25,1 m

Superficie	Material	Coeficiente de Difusión
Suelo	[3]	0,05
Pared	[1]	0,05
Audiencia	[6]	0,7
Techo	[1]	0,05
Escenario	[1]	0,05



PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

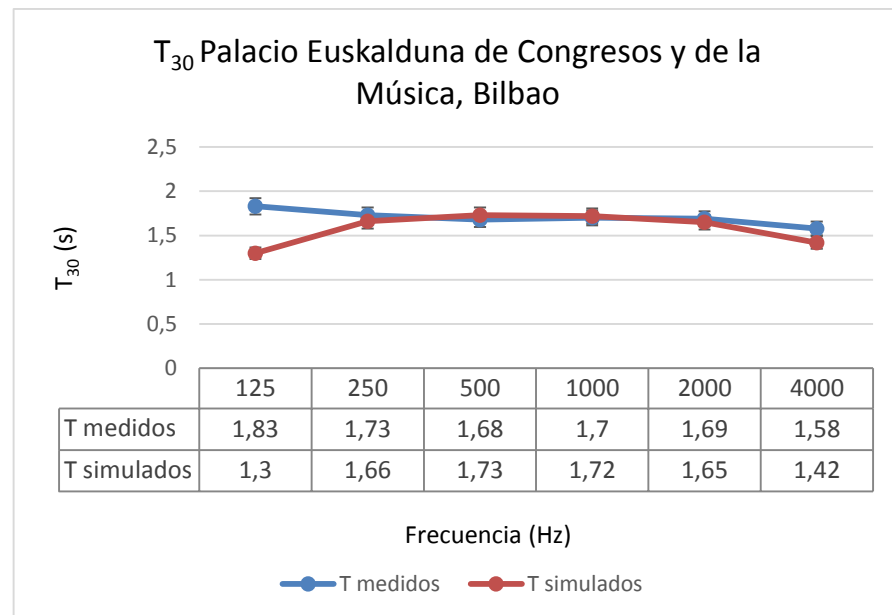
- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía, nos dan los datos en condiciones de sala llena habiéndose estimado con las fórmulas incluidas en “*Higini Arau (1999) ABC de la Acustica Arquitectonica*”.
- **RECEPTORES:** No se especifican.
- **FUENTE:** No se especifica.
- **SEÑAL EMITIDA:** MLS ISO 3382.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala llena.
- **RECEPTORES:** No se especifican.
- **FUENTE:** Escenario.

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	1,69	1,73
Índice de Calidez (s)	1,05	0,86
Índice de Brillo (s)	0,97	0,89



Gráfica 3 Tiempos de reverberación por frecuencias

5.2.4 SALA PRINCIPAL - AUDITORIO-PALACIO DE CONGRESOS PRÍNCIPE FELIPE - OVIEDO

CÓDIGO	007
DESCRIPCIÓN	
<p>El Palacio de Congresos-Auditorio "Príncipe Felipe" se inauguró en la primavera de 1999.</p> <p>Lo diseñó el arquitecto Rafael Beca, el edificio ha sido proyectado, en una personalísima arquitectura neoclásica, sobre el antiguo depósito de aguas de Oviedo, del que se respetó su arquitectura original, con los arcos y bóvedas del antiguo aljibe, que data de 1846.</p> <p>Uno de los aspectos más cuidados del auditorio fue la acústica, de la que se encargó el físico catalán Higiní Arau.</p> <p>La gran polivalencia del edificio permite celebrar actos con muy distintos aforos (desde 50 a 2.000 personas) pero también con numerosas actividades simultáneas (traducción, proyección, videoconferencia...).</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 	
[Fotografía 4- Auditorio Palacio de Congresos Príncipe Felipe.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Terrassa05_CI01.pdf - (pág.52) CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/Nº4_AuditoriosSiglo21	

Datos Técnicos		Dimensiones de la sala	
Capacidad	2.100 localidades	Altura (H)	47,7 m
Volumen sala	15.606 m ³	Anchura (W)	48,7 m
Superficie audiencia	1162 m ²	Longitud (L)	19,4 m
Superficie escenario	328 m ²		

Superficie	Material	Coeficiente de Difusión
Suelo	[4]	0,05
Pared	[1], [9]	0,05
Audiencia	[8]	0,7
Techo	[1]	0,05
Escenario	[3]	0,05



PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

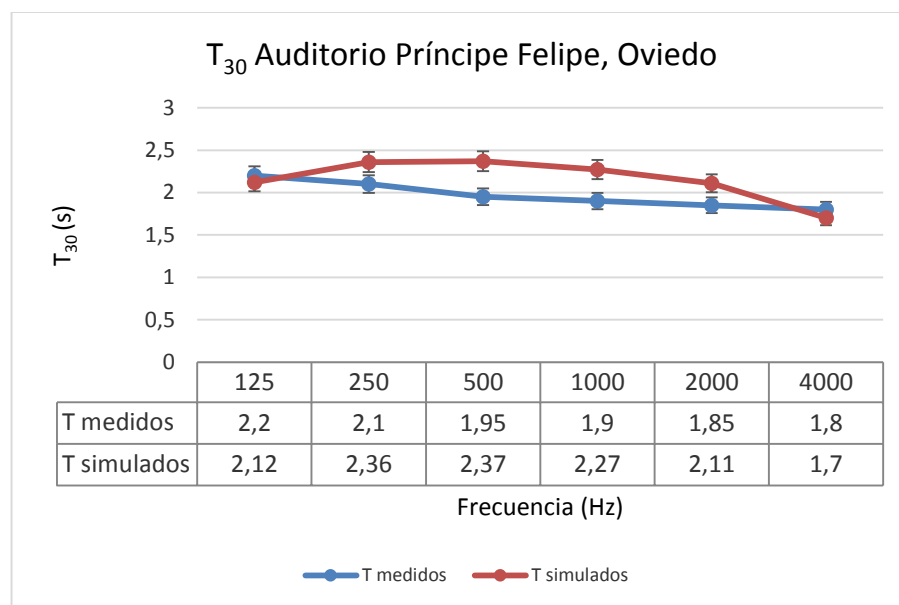
- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala llena.
- **RECEPTORES:** No se especifican.
- **FUENTE:** No se especifica.
- **SEÑAL EMITIDA:** No se especifica.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala llena.
- **RECEPTORES:** No se especifican.
- **FUENTE:** Escenario.

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	1,93	2,32
Índice de Calidez (s)	1,12	0,97
Índice de Brillo (s)	0,95	0,82



Gráfica 4 Tiempos de reverberación por frecuencias

5.2.5 SALA MOZART - AUDITORIO - PALACIO DE CONGRESOS – ZARAGOZA

CÓDIGO	009
DESCRIPCIÓN	
<p>El Auditorio forma parte de un complejo formado por el propio Auditorio - Palacio de Congresos y la Sala Multiusos, destinada a acoger ferias, exposiciones sectoriales, conciertos juveniles, etc. El complejo es obra del arquitecto aragonés José Manuel Pérez Latorre y fue inaugurado el 5 de octubre de 1994.</p> <p>Las dependencias con que cuenta el auditorio son las siguientes: Sala Mozart, sala Luis Galve, sala Mariano Gracia, sala de videoconferencia, sala hipóstila y la sala Multiusos.</p> <p><u>Sala Mozart:</u> Es la principal sala de conciertos. Tiene una capacidad máxima de 1.992 personas y un escenario de 340 metros cuadrados. La sala se emplea también como sede principal de congresos y cuenta con sistema de traducción simultánea, circuito cerrado de televisión, pantallas de proyección LCD, entre otros.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 <p>[Fotografía 5- Sala Mozart. Auditorio Palacio de Congresos Zaragoza.]</p>	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/Nº5_SalaMozartZaragoza	

Datos Técnicos	
Capacidad	1.992 localidades
Volumen sala	23.245 m ³
Superficie audiencia	1593 m ²
Superficie escenario	209 m ²

Dimensiones de la sala	
Altura (H)	59 m
Anchura (W)	46 m
Longitud (L)	20,2 m

Superficie	Material	Coefficiente de Difusión
Suelo	[4]	0,05
Pared	[1]	0,05
Audiencia	[1]	0,05
Techo	[7]	0,7
Escenario	[1]	0,05

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Mediciones en 17 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** Fuente S1. No se especifica situación exacta.
- **SEÑAL EMITIDA:** No se especifica.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Situados en 17 posiciones de la sala. Simulados por zonas (zona A, zona B y zona C).
- **FUENTE:** Escenario.

ESQUEMAS FUENTE Y RECEPTORES

ZONA A: Receptores 2, 3, 4, 7 y 8.

ZONA B: Receptores 6, 9, 11, 12 y 13.

ZONA C: Receptores 1, 5, 10, 14, 15, 16 y 17.

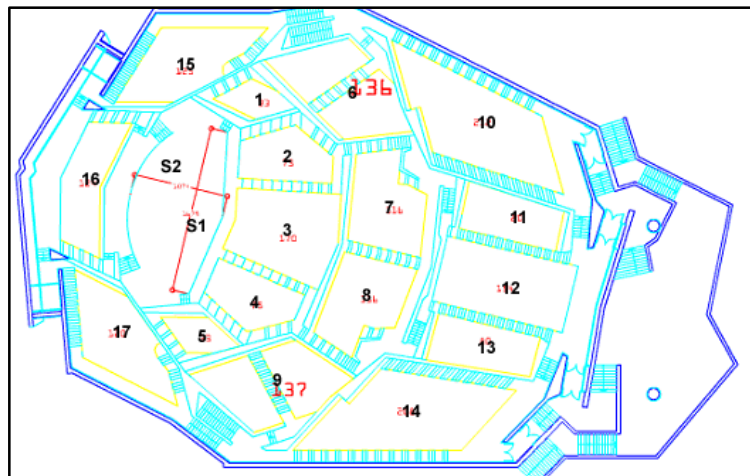


Fig. 29 Posición de fuente S1 y receptores en el área de audiencia en el proceso de medida.

ZONA A: Corresponden a los receptores 2, 3, 4, 7 y 8 de los medidos.

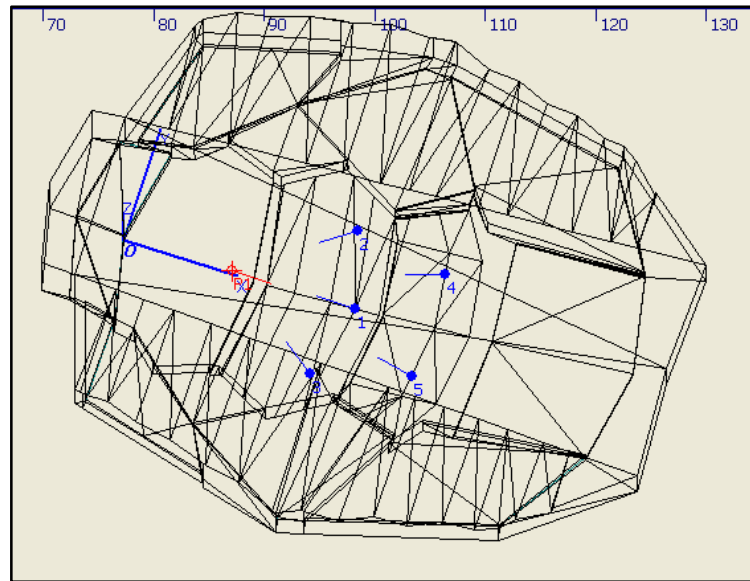


Fig. 30 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia ODEON, ZONA A

Nº1 simulado	Nº3 medido
Nº2 simulado	Nº2 medido
Nº3 simulado	Nº4 medido
Nº4 simulado	Nº7 medido
Nº5 simulado	Nº8 medido

ZONA B: Corresponden a los receptores 6, 9, 11, 12 y 13 de los medidos.

Nº1 simulado	Nº12 medido
Nº2 simulado	Nº9 medido
Nº3 simulado	Nº6 medido
Nº4 simulado	Nº11 medido
Nº5 simulado	Nº13 medido

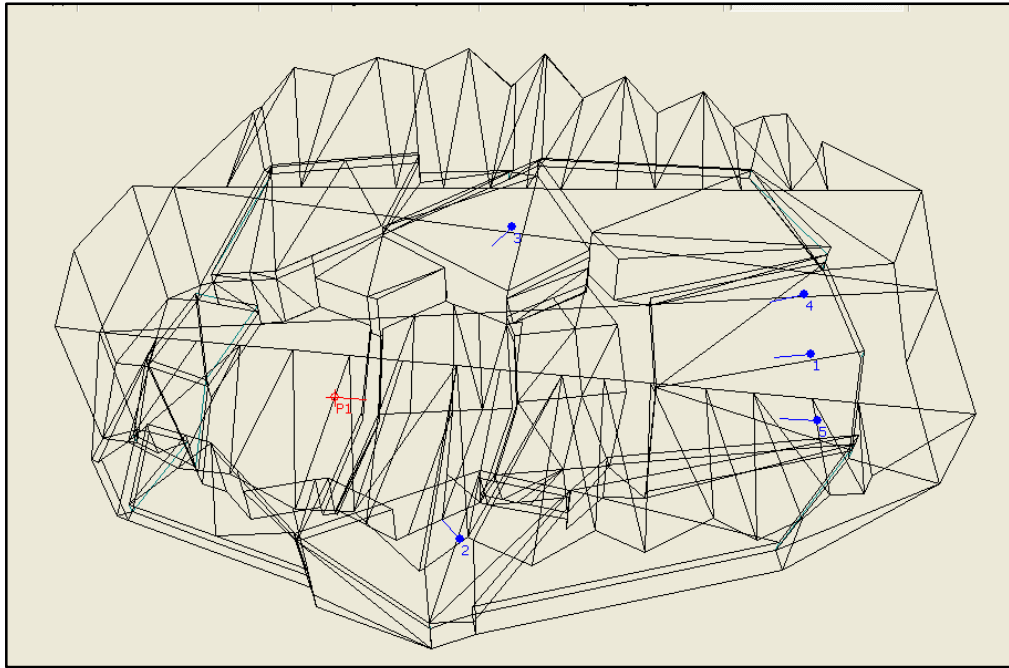


Fig. 31 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia ODEON, ZONA B

ZONA C: Corresponden a los receptores 1, 5, 10, 14, 15, 16 y 17 de los medidos.

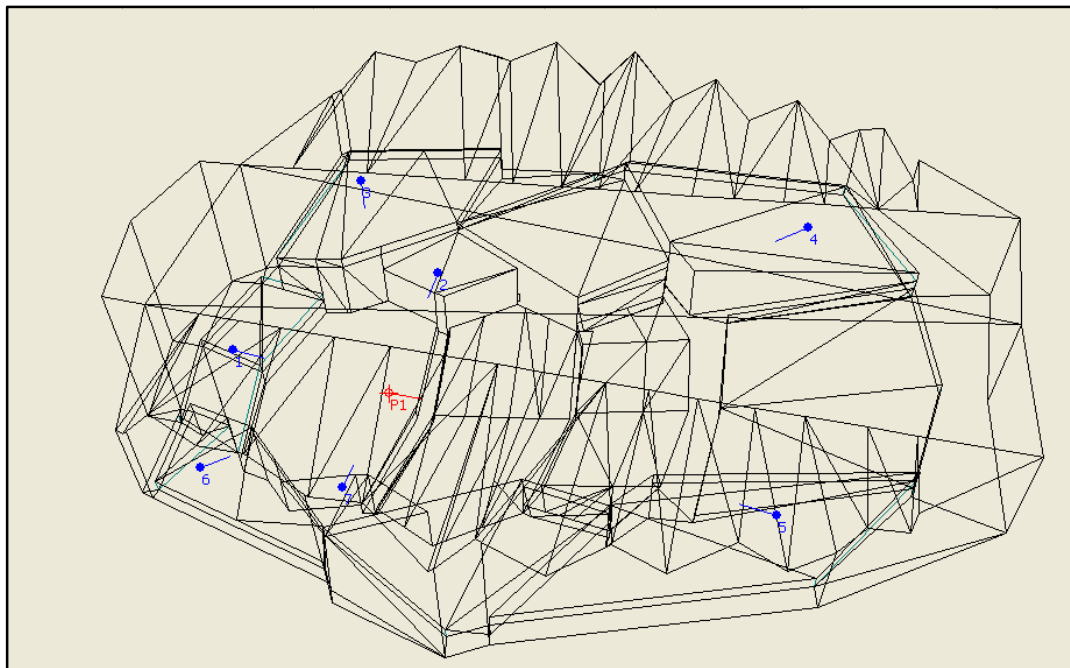
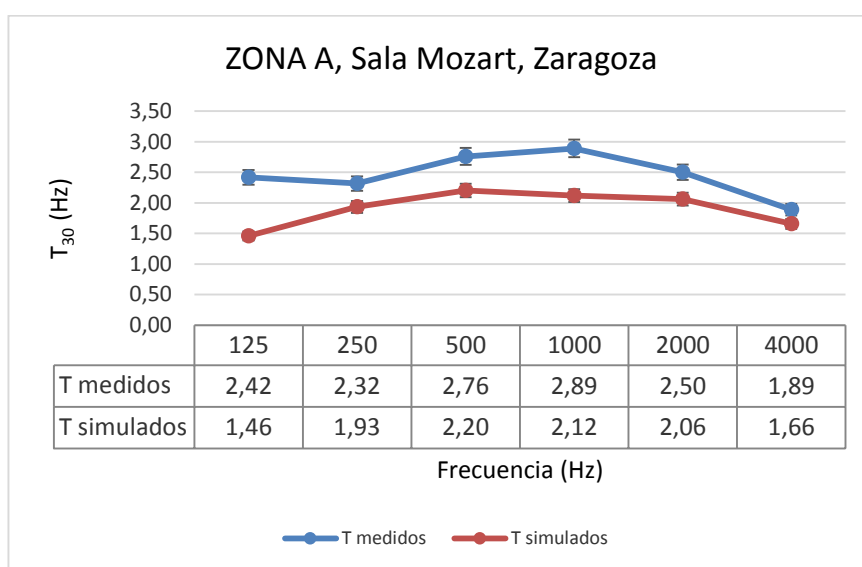


Fig. 32 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia ODEON, ZONA C

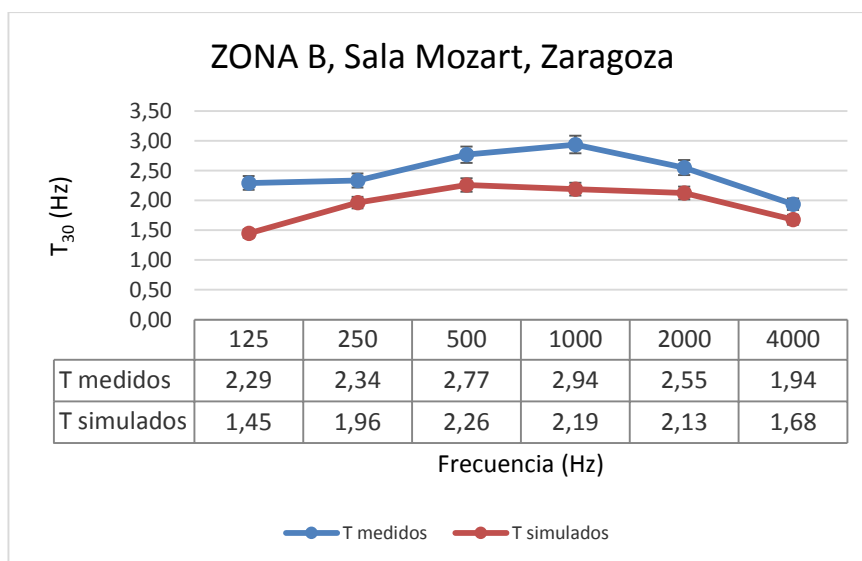
Nº1 simulado	Nº16 medido
Nº2 simulado	Nº1 medido
Nº3 simulado	Nº15 medido
Nº4 simulado	Nº10 medido
Nº5 simulado	Nº14 medido
Nº6 simulado	Nº17 medido
Nº7 simulado	Nº5 medido

RESULTADOS POR PARÁMETROS

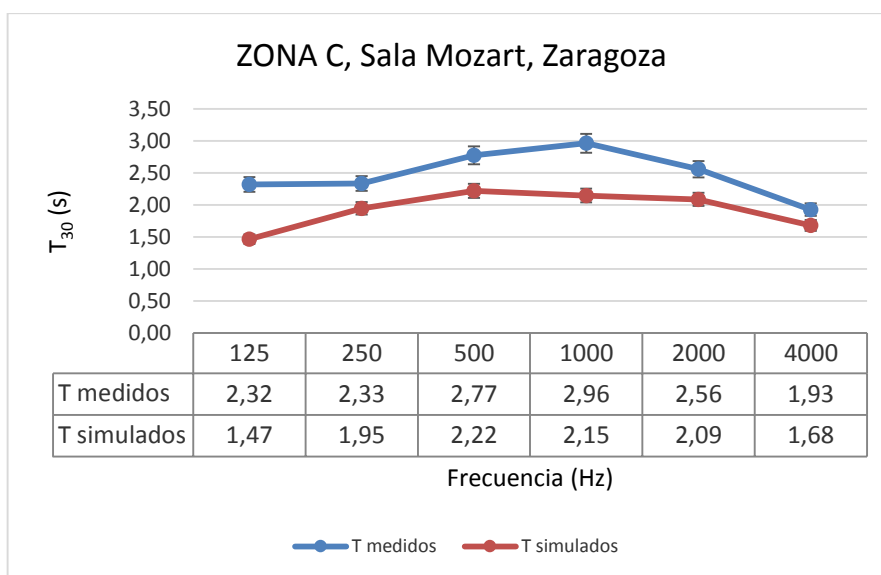
Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	2,85	2,19
Índice de Calidez (s)	0,82	0,78
Índice de Brillo (s)	0,78	0,86
EDT (s)	2,68	2,09
Claridad musical C_{80}	-0,76	-2,19
Claridad de la palabra C_{50}	-2,87	-6,64



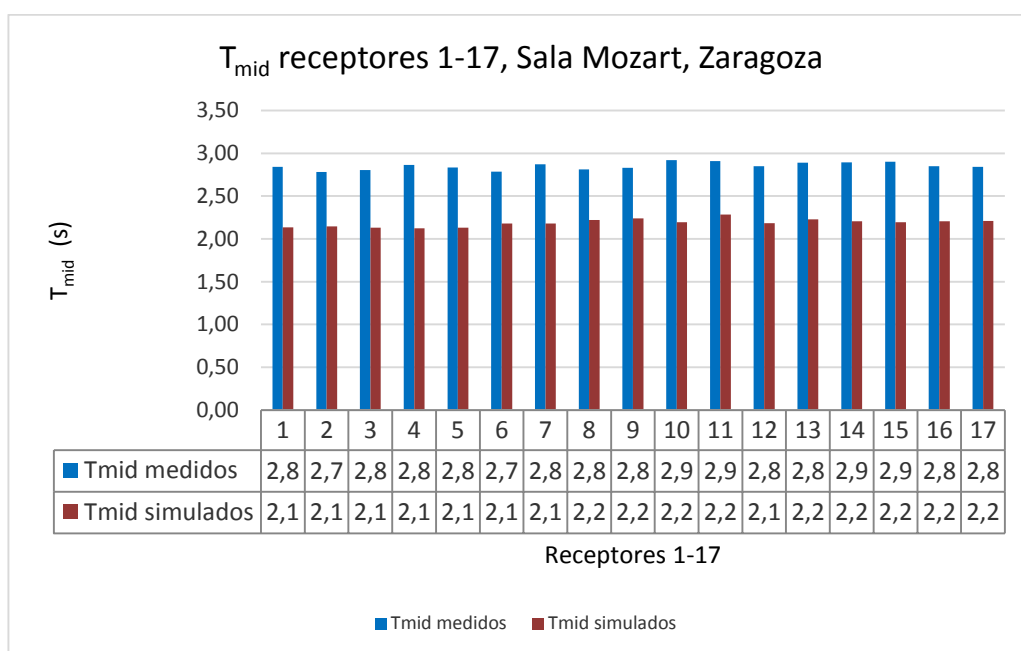
Gráfica 5 Tiempos de reverberación por frecuencias- ZONA A



Gráfica 6 Tiempos de reverberación por frecuencias- ZONA B



Gráfica 7 Tiempos de reverberación por frecuencias- ZONA C



Gráfica 8 Tiempos de reverberación medios por receptores

PLANOS

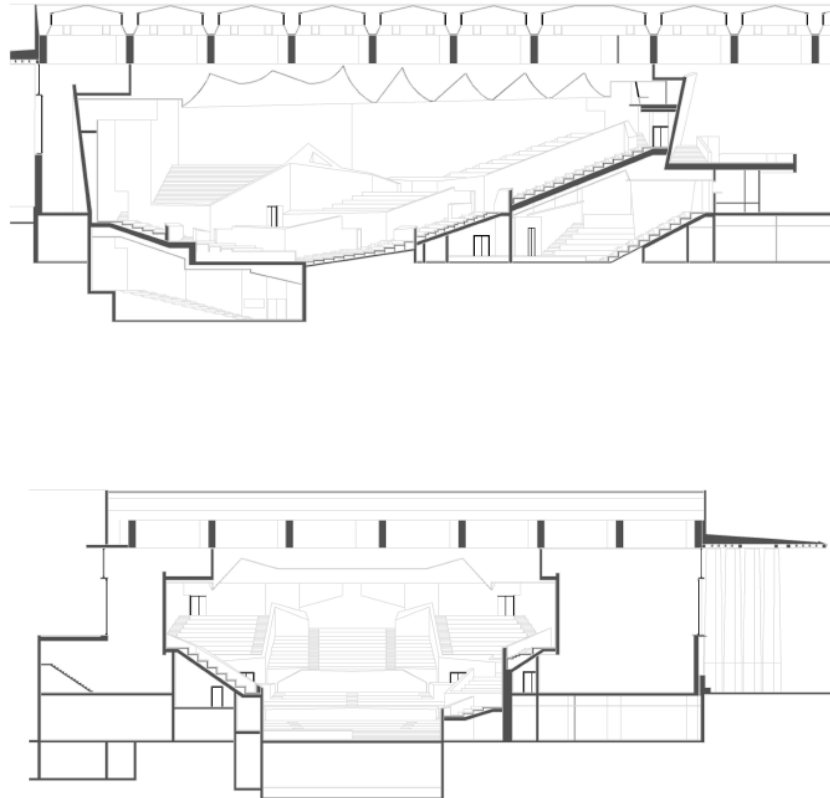


Fig. 33 Sección y sección escenario sala Mozart Zaragoza

5.2.6 AUDITORIO - CENTRO KURSAAL - SAN SEBASTIÁN

CÓDIGO	012
DESCRIPCIÓN	
<p>El arquitecto de esta obra es Rafael Moneo, se sitúa frente al mar Cantábrico y es epicentro de la actividad cultural y congresual de la ciudad, que acoge más de 300 eventos y 600.000 asistentes anuales.</p> <p>Consta del auditorio, salas de reuniones y áreas de exposición. Tiene reconocimientos como la 'Q' de Plata a la Excelencia en la Gestión y el certificado ISO 9001:2000. El Kursaal es, además, el primer palacio de congresos del Estado acreditado con el Certificado de Accesibilidad Global.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 	
[Fotografía 6- Centro Kuursal. San Sebastián.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/Nº6_KursaalSansebastian	

Datos Técnicos	
Capacidad	1.806 localidades
Volumen sala	14.779 m ³
Superficie audiencia	813 m ²
Superficie escenario	307 m ²

Dimensiones de la sala	
Altura (H)	55,5 m
Anchura (W)	27,6 m
Longitud (L)	18,2 m

Superficie	Material	Coeficiente de Difusión
Suelo	[4], [1]	0,05
Pared	[1]	0,05
Audiencia	[5]	0,7
Techo	[1]	0,05
Escenario	[1]	0,05

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Mediciones en 12 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** Fuente S1. No se especifica situación exacta.
- **SEÑAL EMITIDA:** No se especifica.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Situados en 12 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** Escenario.

ESQUEMAS FUENTE Y RECEPTORES

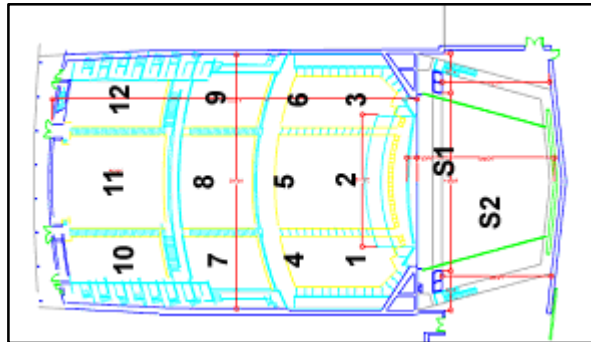


Fig. 34 Posición de fuente S1 y receptores en el área de audiencia en el proceso de medida.

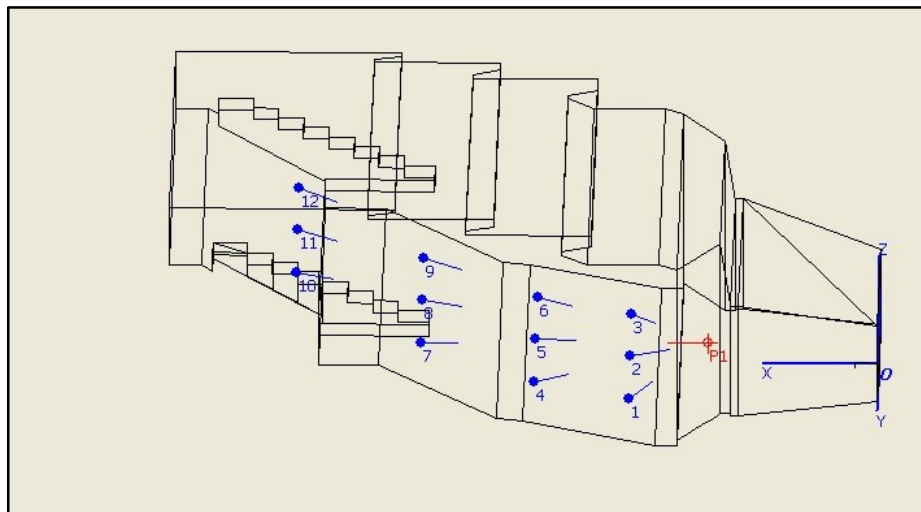


Fig. 35 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia ODEON

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	1,93	2,21
Índice de Calidez (s)	1,04	0,69
Índice de Brillo (s)	1,01	0,89
EDT (s)	1,75	1,99
Claridad musical C_{80}	-0,88	-1,01
Claridad de la palabra C_{50}	-2,92	-3,82

PLANOS

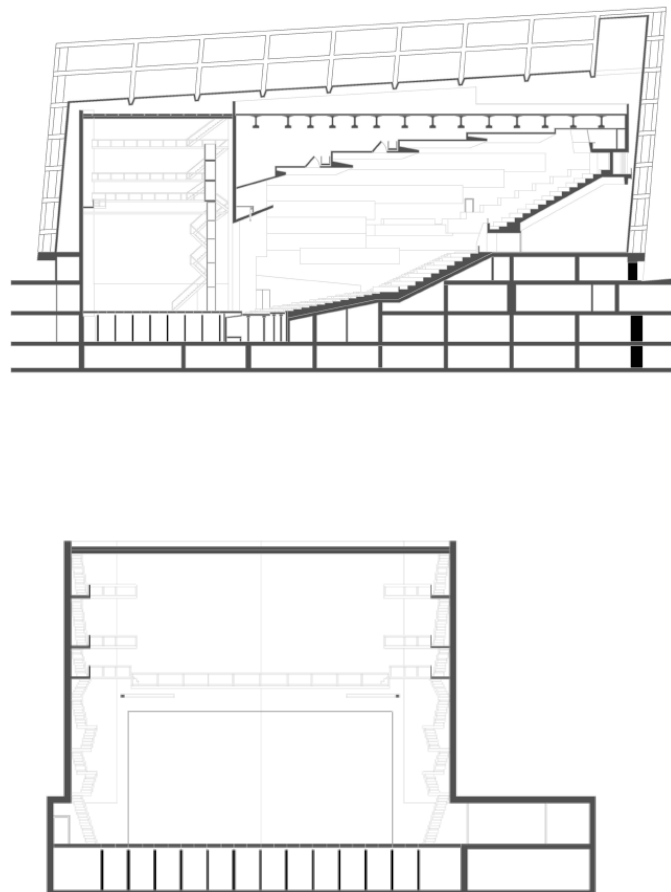


Fig. 36 Sección y sección escenario centro Kursaal, San Sebastián

5.2.7 SALA SINFÓNICA - AUDITORIO ALFREDO KRAUS - LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

CÓDIGO	017
DESCRIPCIÓN	
<p>Creado por Óscar Tusquets, se construyó entre 1993 y 1997.</p> <p>En el auditorio Alfredo Kraus se celebra anualmente el Festival Internacional de Cine de Las Palmas de Gran Canaria y el Festival de Música de Canarias, entre otros festivales, promoviendo además certámenes, exposiciones, congresos, convenciones y contactos de todo tipo. Es la sede de la Orquesta Filarmónica de Gran Canaria.</p> <p><u>Sala Sinfónica:</u></p> <p>Es el reflejo de un diseño perfectamente armonizado entre el enclave marino del edificio y la capacidad para acomodar a 1.646 personas.</p> <p>Es escenario habitual del Festival de Música de Canarias, esta sala ha acogido a orquestas de talla y renombre, tales como la Orquesta Filarmónica de Viena, la Royal Concertgebouw de Amsterdam, y a grandes orquestas estadounidenses como las de Boston, Filadelfia o Nueva York.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 	
[Fotografía 7- Sala Sinfónica - Auditorio Alfredo Kraus. Las Palmas de Gran Canaria.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Sevilla02_rba02021.pdf CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/Nº7_AlfredoKrausLasPalmas	

Datos Técnicos			Dimensiones de la sala	
Capacidad	1.646 localidades		Altura (H)	18,98 m
Volumen sala	18.701 m ³		Anchura (W)	35,16 m
Superficie audiencia	1044 m ²		Longitud (L)	55,24 m
Superficie escenario	251 m ²			
Superficie	Material	Coeficiente de Difusión		
Suelo	[4]	0,05		
Pared	[3]	0,05		
Audiencia	[7]	0,7		
Techo	[1], [2]	0,05		
Escenario	[1]	0,05		



PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

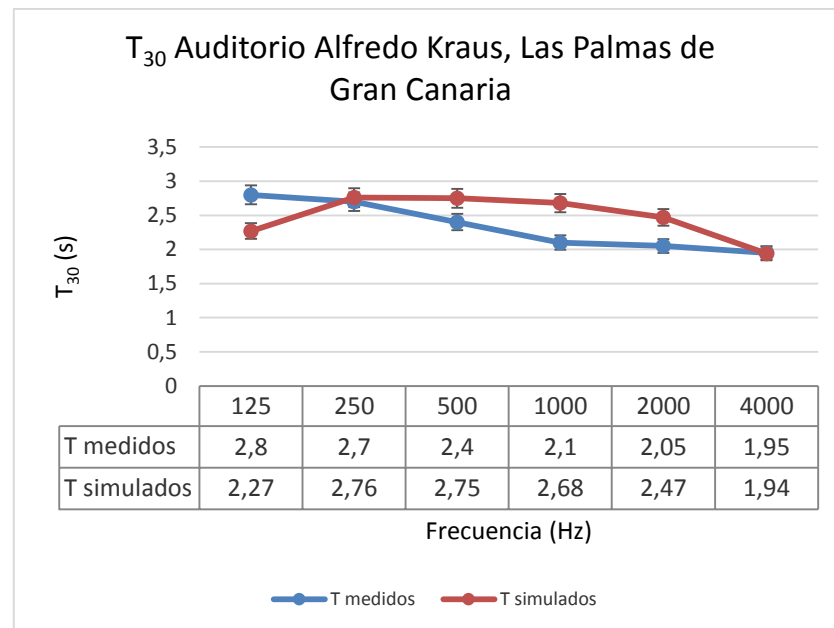
- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** No se especifican.
- **FUENTE:** No se especifica.
- **SEÑAL EMITIDA:** No se especifica.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** No se especifica.
- **FUENTE:** Escenario.

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	2,25	2,72
Índice de Calidez (s)	1,22	0,93
Índice de Brillo (s)	0,89	0,81



Gráfica 9 Tiempos de reverberación por frecuencias

5.2.8 SALA PRINCIPAL - BALUARTE. PALACIO DE CONGRESOS Y AUDIT. DE NAVARRA - PAMPLONA

CÓDIGO	021
DESCRIPCIÓN	
<p>El Palacio de Congresos y Auditorio de Navarra, conocido también como Baluarte, es un edificio terminado en 2003 cuyo fin es contribuir al desarrollo cultural de Pamplona y en general de Navarra.</p> <p>Es un gran espacio capaz de albergar todo tipo de eventos culturales y comerciales. Se trata de uno de los espacios de este tipo más grandes de España.</p> <p>El edificio fue diseñado por el arquitecto navarro Francisco Mangado y promovido por el Gobierno de Navarra, y su construcción costó 77 millones de euros.</p> <p>Baluarte cuenta con una sala sinfónica para 1.568 personas, una sala de cámara para 444 personas, salas de exposiciones, de congresos y de conferencias, camerinos, restaurante, cafeterías, aparcamiento para 900 coches...</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 	
[Fotografía 8- Baluarte - Palacio de Congresos y Audit. de Navarra.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/Nº8_BaluartePamplona	

Datos Técnicos	
Capacidad	1.568 localidades
Volumen sala	16.799 m ³
Superficie audiencia	961 m ²
Superficie escenario	151 m ²

Dimensiones de la sala	
Altura (H)	29,7 m
Anchura (W)	52,9 m
Longitud (L)	19 m

Superficie	Material	Coeficiente de Difusión
Suelo	[4]	0,05
Pared	[2]	0,05
Audiencia	[5]	0,7
Techo	[1]	0,05
Escenario	[2]	0,05

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Mediciones en 9 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** Fuente S1.
- **SEÑAL EMITIDA:** No se especifica.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Situados en 9 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** Escenario. Fuente S1.

ESQUEMAS FUENTE Y RECEPTORES

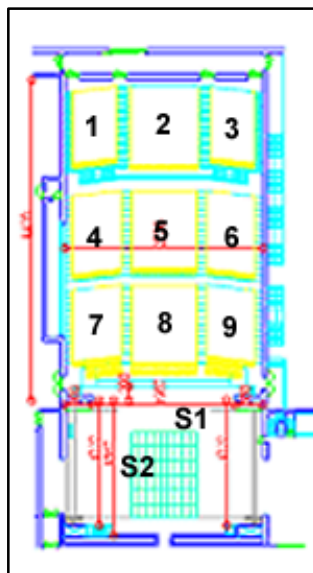


Fig. 37 Posición de fuente S1 y receptores en el área de audiencia en el proceso de medida

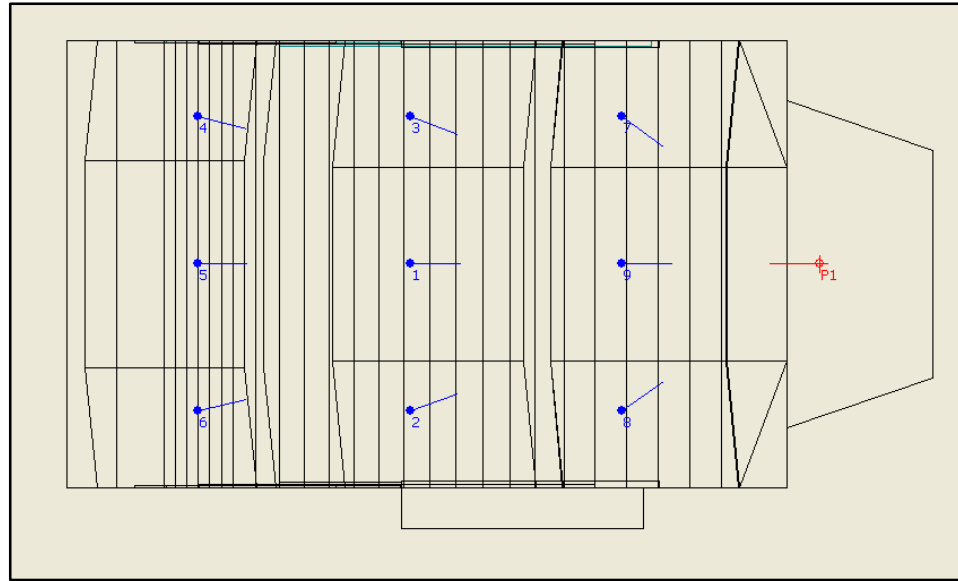
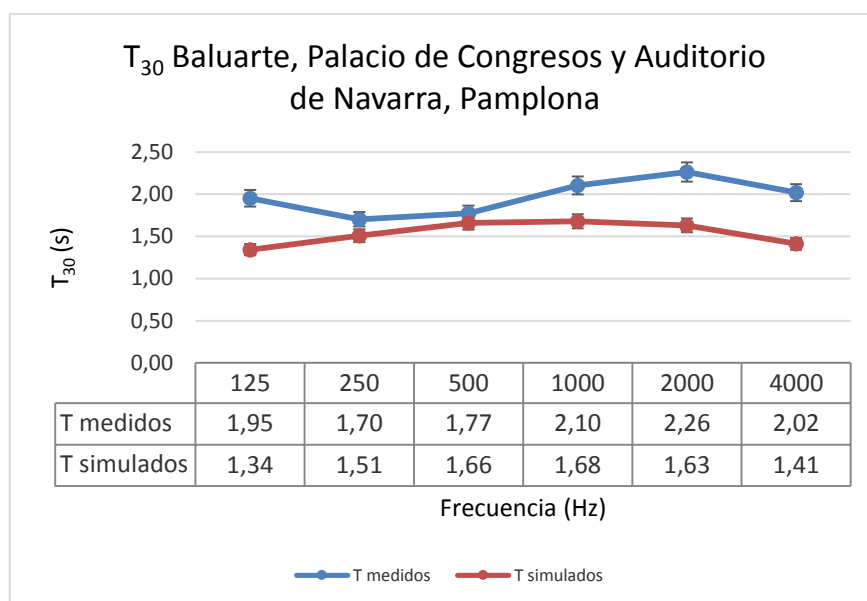


Fig. 38 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia ODEON.

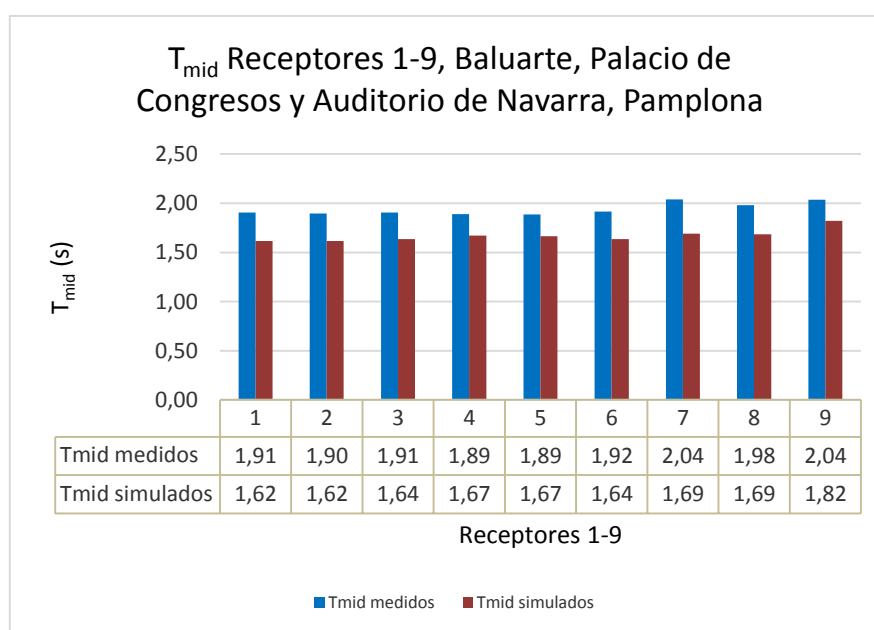
Nº1 simulado	Nº5 medido
Nº2 simulado	Nº4 medido
Nº3 simulado	Nº6 medido
Nº4 simulado	Nº3 medido
Nº5 simulado	Nº2 medido
Nº6 simulado	Nº1 medido
Nº7 simulado	Nº9 medido
Nº8 simulado	Nº7 medido
Nº9 simulado	Nº8 medido

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	1,94	1,67
Índice de Calidez (s)	0,94	0,85
Índice de Brillo (s)	1,01	0,89
EDT (s)	1,75	1,45
Claridad musical C_{80}	-1,87	0,30
Claridad de la palabra C_{50}	-3,86	-2,78



Gráfica 10 Tiempos de reverberación por frecuencias



Gráfica 11 Tiempos de reverberación medios por receptor

5.2.9 AUDITORIO MANUEL DE FALLA - GRANADA

CÓDIGO	033
DESCRIPCIÓN	
<p>El Auditorio Manuel de Falla de Granada es la sede de la Orquesta Ciudad de Granada, y del Centro Cultural y Archivo Musical Manuel de Falla. Fue inaugurado en 1978. El edificio está formado por dos grandes salas, de excelente acústica, situadas a ambos lados del escenario.</p> <p>Para conseguir la mejor acústica posible, se relacionó el volumen de aire interior con el aforo del auditorio. Este factor volumétrico, íntimamente ligado con el factor económico, aconsejó no sobrepasar la capacidad de las “salas medias” europeas, que se sitúa entre el Konserthus de Gothenburg y el Queen Elizabeth Hall de Londres. El estudio acústico fue realizado por el Lothar Cremer, asesor acústico en la construcción de la nueva Philharmonie de Berlín. El techo, dividido en pequeñas superficies convexas cuidadosamente diseñadas, desarrolla las funciones de difusión del campo sonoro. Se proyectaron paredes reflectoras a ambos lados del escenario, quebradas por pequeños balcones, garantizando así un equilibrio sonoro óptimo entre los instrumentos de cuerda y el metal.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
	
[Fotografía 9-Auditorio Manuel de Falla, Granada.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/ N°9_ManuelDeFallaGranada	

Datos Técnicos			Dimensiones de la sala	
Capacidad	1.313 localidades		Altura (H)	19,27 m
Volumen sala	11.895 m ³		Anchura (W)	27,00 m
Superficie audiencia	754,6 m ²		Longitud (L)	53,45 m
Superficie escenario	178,24 m ²			

Superficie	Material	Coefficiente de Difusión
Suelo	[4]	0,05
Pared	[1], [6], [14]	0,05
Audiencia	[7]	0,7
Techo	[1]	0,05
Escenario	[3]	0,05

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Mediciones en 23 posiciones de la sala. Medidos por zonas, 18 posiciones delante del escenario (sala A), 5 posiciones detrás del escenario (sala B).
- **FUENTE:** Escenario.
- **SEÑAL EMITIDA:** No se especifica.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Situados en 23 posiciones de la sala. Situados por zonas, 18 posiciones delante del escenario (sala A), 5 posiciones detrás del escenario (sala B).
- **FUENTE:** Escenario.

ESQUEMAS FUENTE Y RECEPTORES

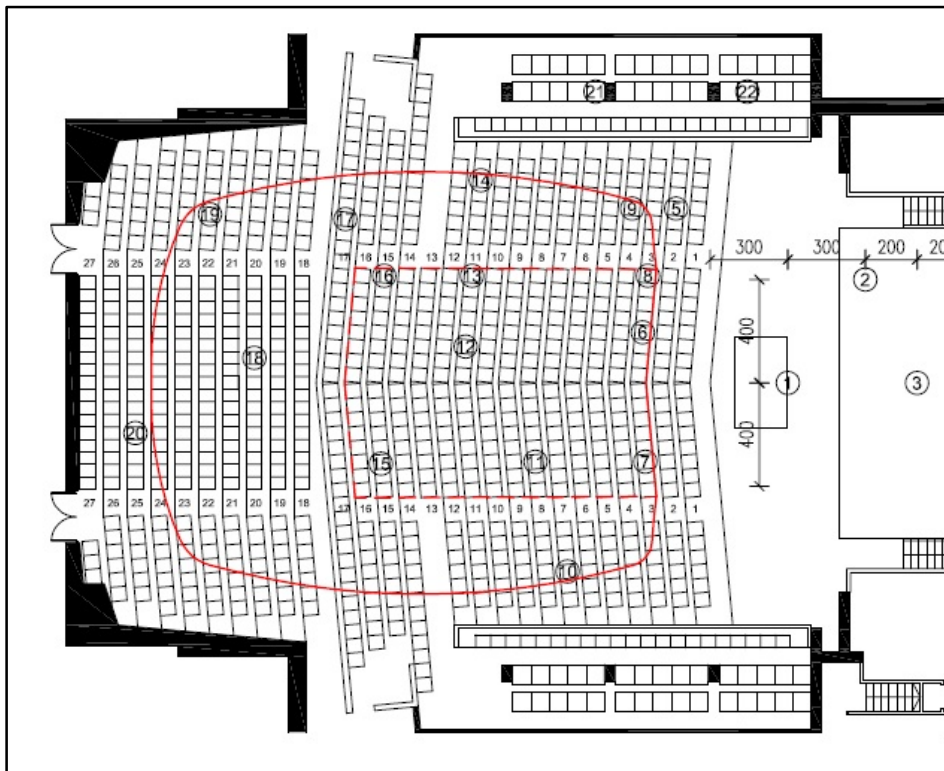


Fig. 39 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia en el proceso de medida, SALA A

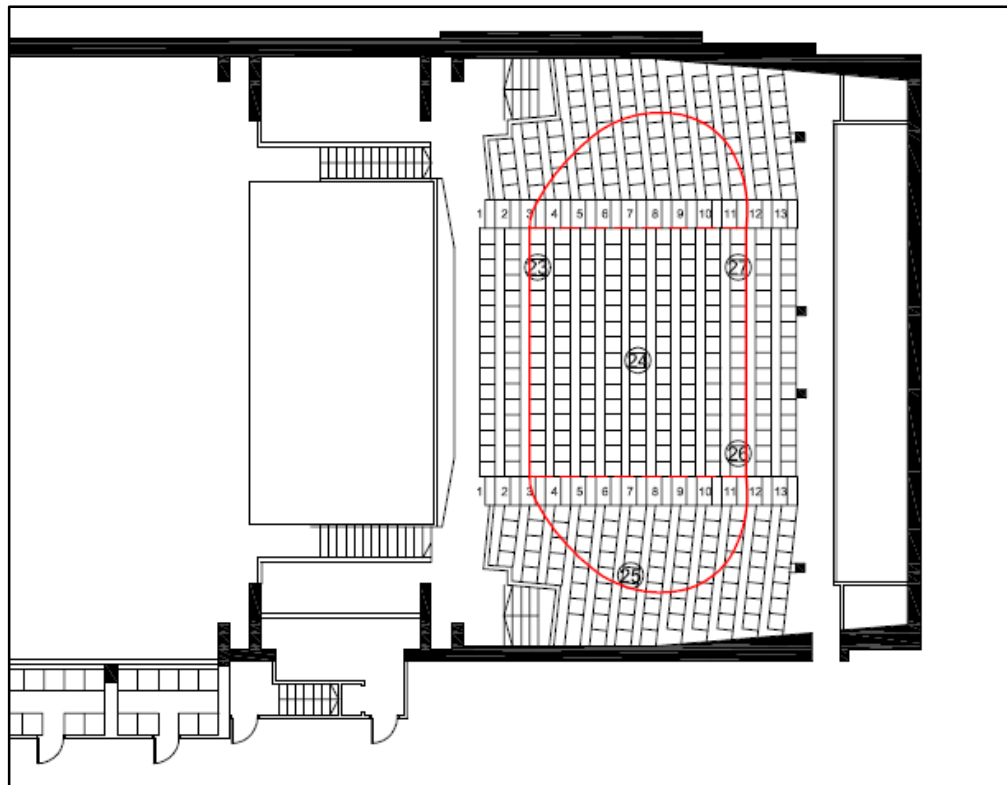


Fig. 40 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia en el proceso de medida, SALA B

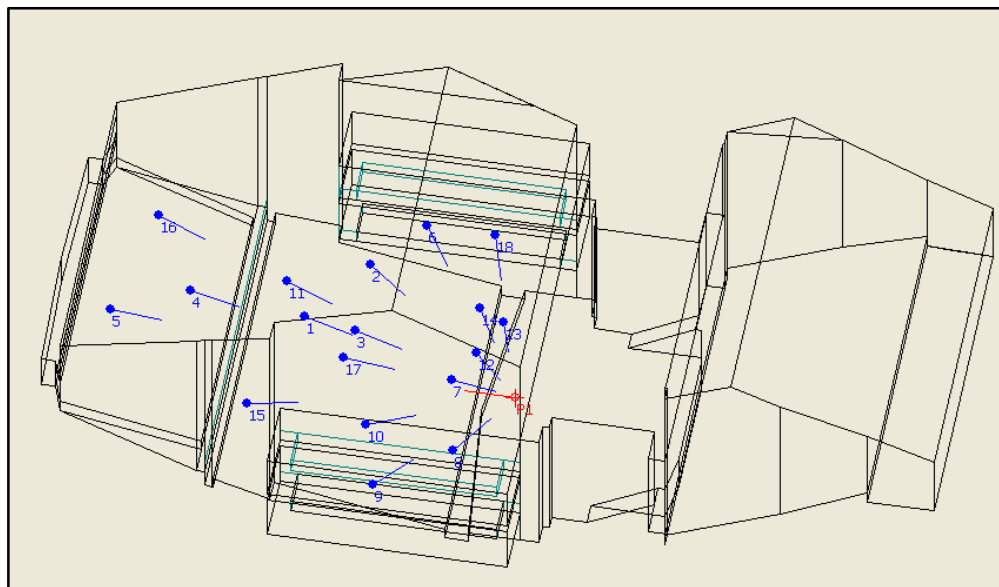


Fig. 41 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia ODEON, SALA A

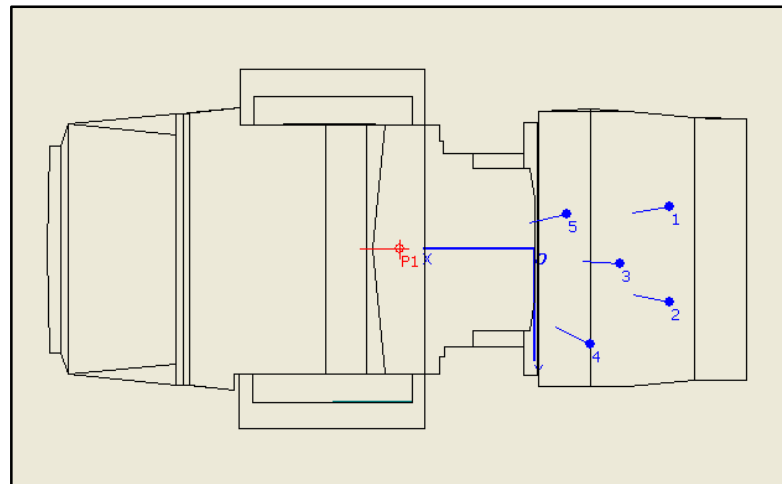


Fig. 42 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia ODEON, SALA B

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	2,34	2,16
Índice de Calidez (s)	1,09	0,93
Índice de Brillo (s)	0,82	0,85
EDT (s)	1,98	2,24
Claridad musical C_{80}	0,33	0,35
Claridad de la palabra C_{50}	-1,84	-1,97

SALA A	
T_{mid} medido (s)	2,33
T_{mid} simulado (s)	2,19

SALA B	
T_{mid} medido (s)	2,34
T_{mid} simulado (s)	2,13

PLANOS

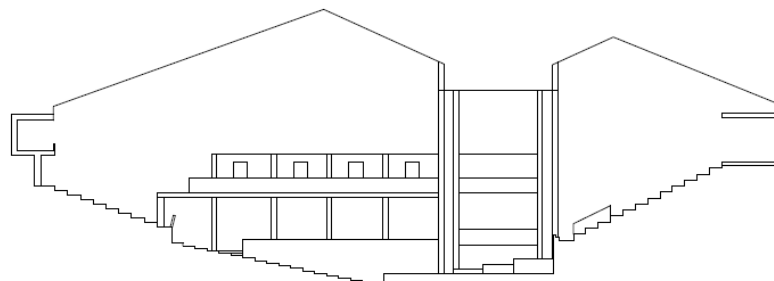


Fig. 43 Sección auditorio Manuel de Falla, Granada.

5.2.10 GRAN TEATRO FALLA - CÁDIZ

CÓDIGO	039
DESCRIPCIÓN	
<p>Los planos de su construcción, entre 1884 y 1905, pertenecen a Adolfo Morales, y la dirección a Juan Cabrera Latorre. Su construcción se realizó sobre las cenizas del anterior Gran Teatro.</p> <p>El 12 de enero de 1910 se inauguró con la interpretación de una sinfonía de Barbieri. El teatro está lujosamente decorado con motivos mudéjares. El techo se cubre con un gran lienzo, obra de Felipe Abarzuza, que representa una alegoría del Paraíso. Actualmente es la sede del afamado concurso de agrupaciones del Carnaval de Cádiz, el Festival de Teatro Iberoamericano y del Certamen Alcances de cine, además de las distintas manifestaciones culturales que pasan por la ciudad.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 	
[Fotografía 10- Gran Teatro de Falla, Cádiz.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/ N°10_GTeatroFallaCadiz	

Datos Técnicos	
Capacidad	1.214 localidades
Volumen sala	10.472 m ³
Superficie audiencia	601,62 m ²
Superficie escenario	295,81 m ²

Dimensiones de la sala	
Altura (H)	16,05 m
Anchura (W)	28,25 m
Longitud (L)	41,59 m

Superficie	Material	Coefficiente de Difusión
Suelo	[17], [4]	0,05
Pared	[9]	0,05
Audiencia	[5]	0,7
Techo	[9]	0,05
Escenario	[11]	0,05

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Mediciones en 15 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** Escenario.
- **SEÑAL EMITIDA:** No se especifica.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Situados en 15 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** Escenario.
- **OTRAS ESPECIFICACIONES:** Sin concha acústica (SC).

ESQUEMAS FUENTE Y RECEPTORES

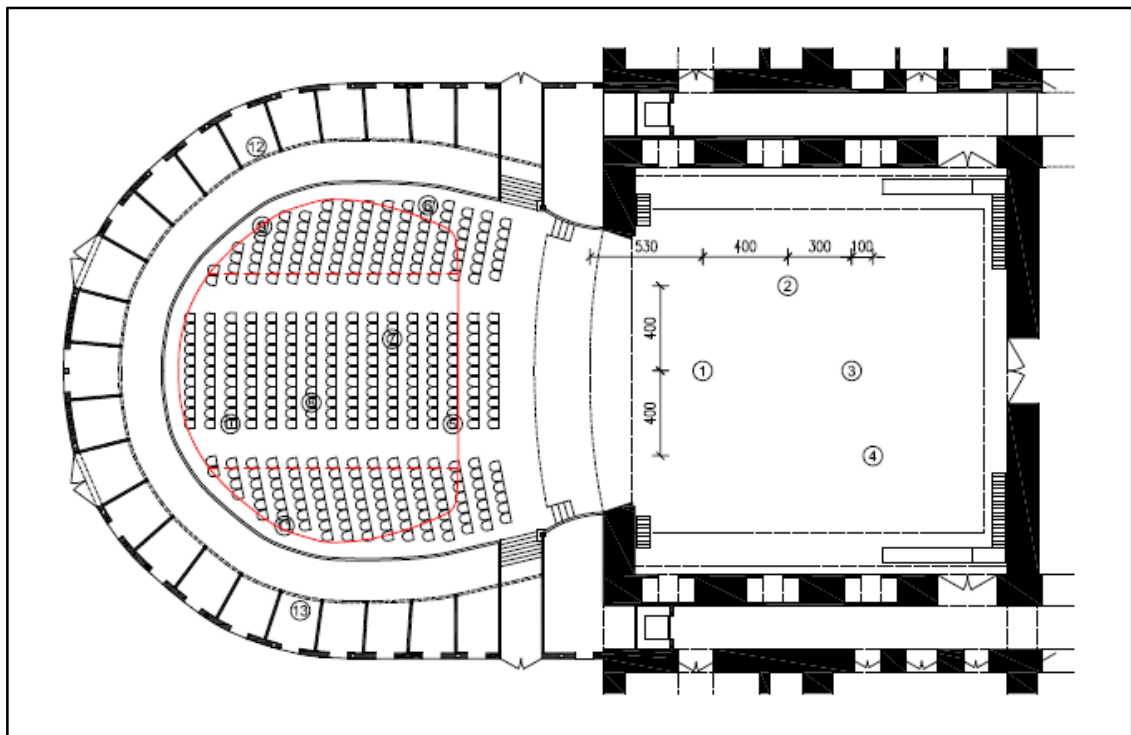


Fig. 44 Posición de fuente y receptores en el proceso de medida, PLANTA BAJA

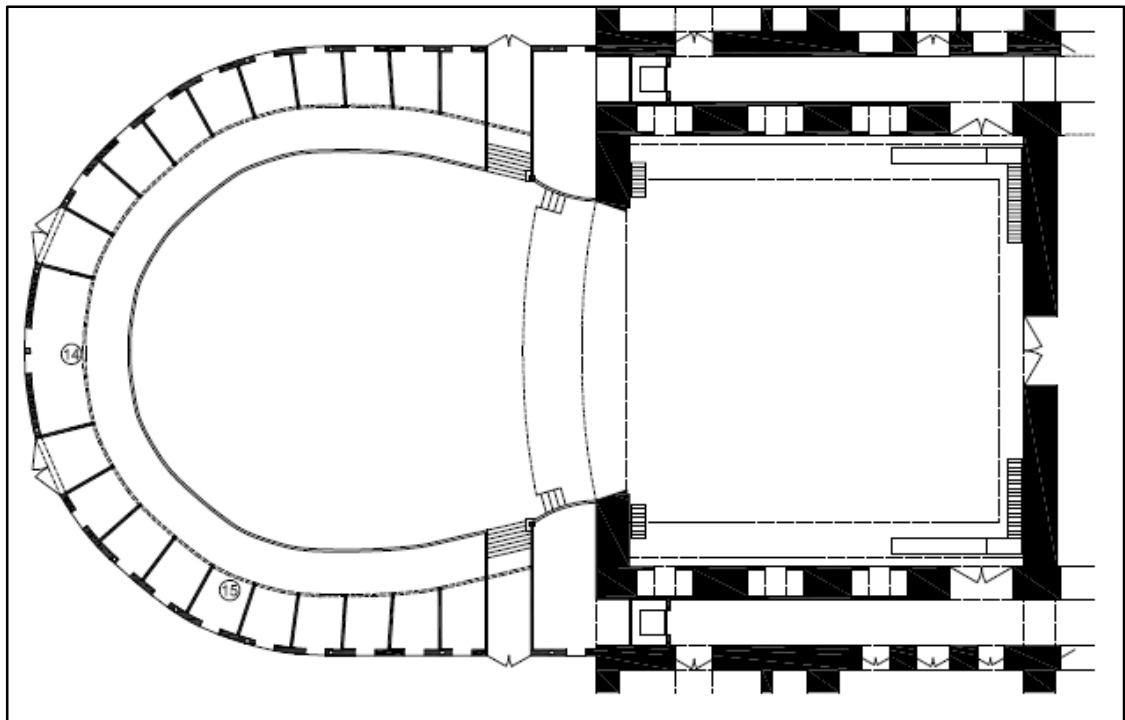


Fig. 45 Posición de fuente y receptores en el proceso de medida, PLANTA PRIMERA

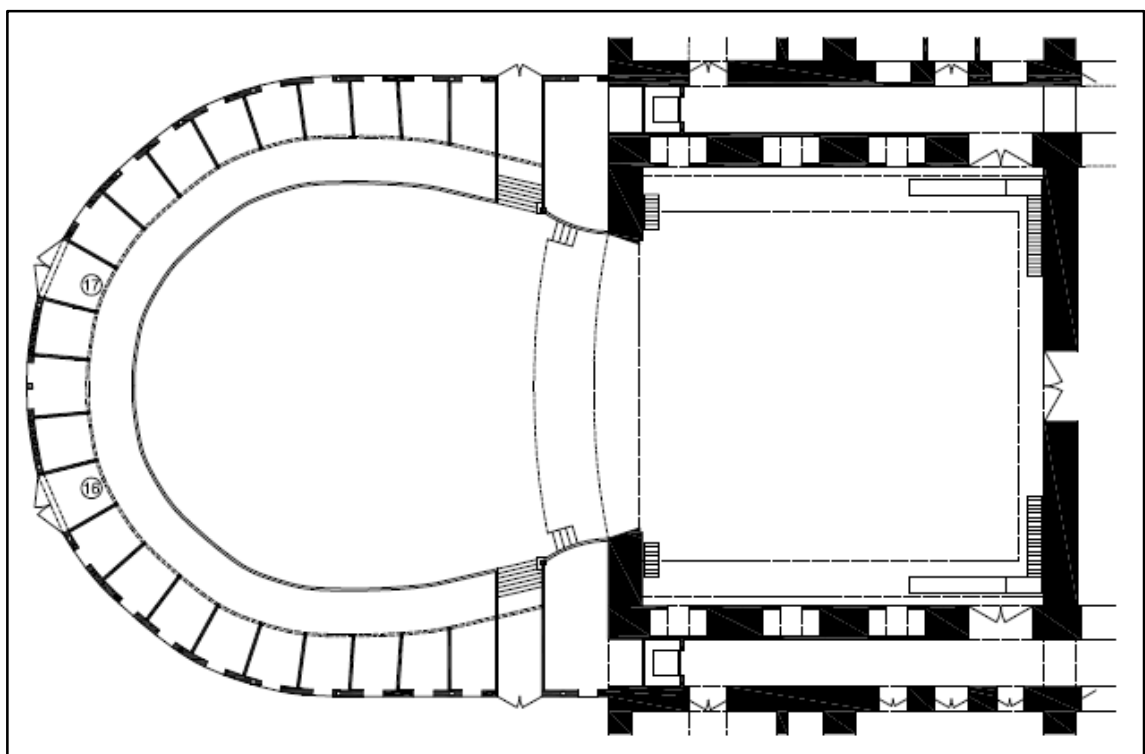


Fig. 46 Posición de fuente y receptores en el proceso de medida, PLANTA SEGUNDA

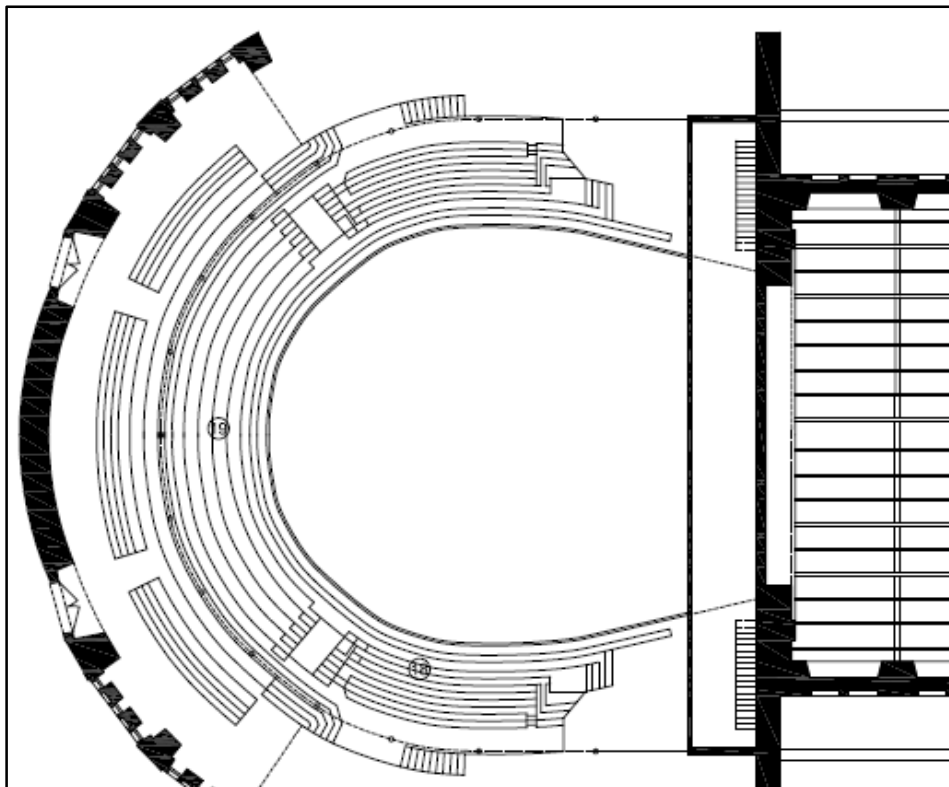


Fig. 47 Posición de fuente y receptores en el proceso de medida, PLANTA TERCERA

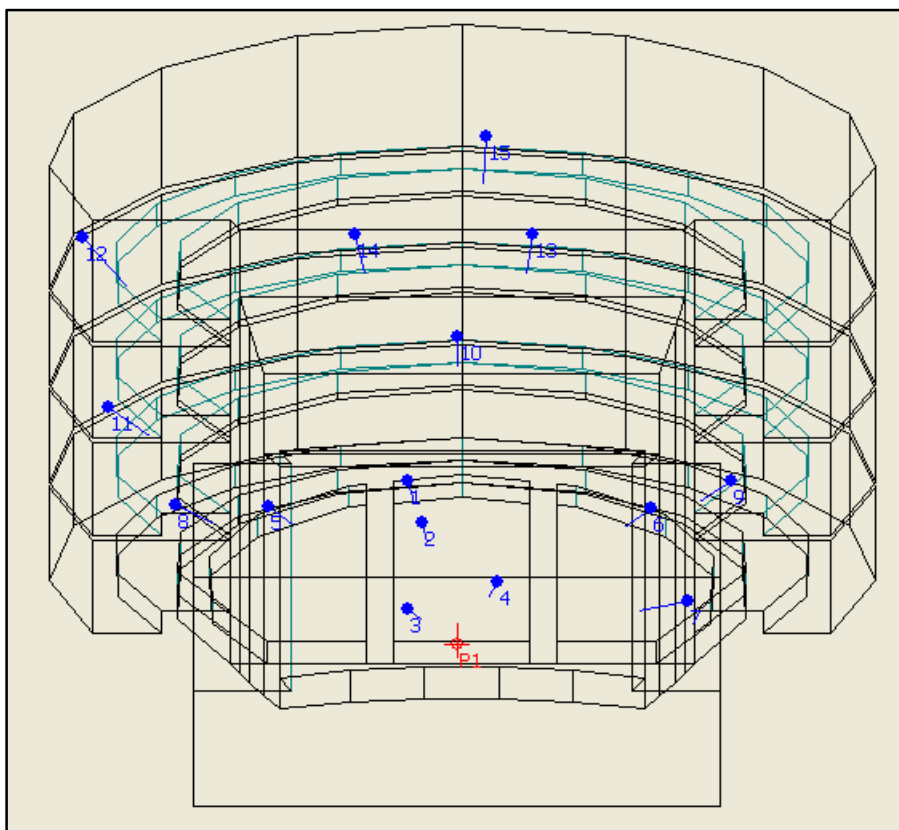


Fig. 48 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia ODEON

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	1,89	1,22
Índice de Calidez (s)	1,23	1,27
Índice de Brillo (s)	0,8	0,86
EDT (s)	1,35	1,08
Claridad musical C_{80}	2,92	3,95
Claridad de la palabra C_{50}	0,87	1,30

PLANOS

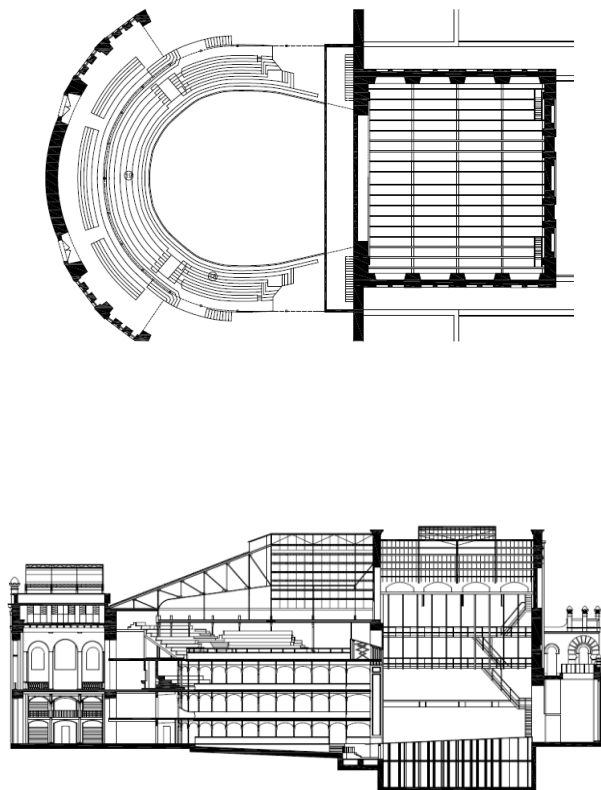


Fig. 49 Planta y sección Gran Teatro Falla, Cádiz

5.2.11 TEATRO ROMEA - MURCIA

CÓDIGO	040
DESCRIPCIÓN	
<p>El Teatro Romea de Murcia está situado en la plaza de Julián Romea del centro histórico de la ciudad de Murcia. Se trata del principal teatro de la localidad y uno de los más importantes del país.</p> <p>La tercera inauguración del teatro (después de los dos incendios) tuvo lugar el 16 de febrero de 1901. La compañía de María Guerrero y Fernando Díaz de Mendoza puso en escena <i>El estigma</i>, de Echegaray.</p> <p>Importantes hitos en la historia del teatro fueron los diversos estrenos de obras de Jacinto Benavente que contaron con la presencia del autor, o la actuación en 1933 del teatro universitario La Barraca, dirigido por Federico García Lorca.</p> <p>La fachada pertenece al más puro eclecticismo. Cuenta con rasgos de clara inspiración neoclásica, con detalles modernistas como la marquesina y las verjas de forja de la entrada.</p> <p>El salón de actos tiene forma de herradura, con patio de butacas rodeado de plateas, tres niveles de palcos y otros tantos de gradas superiores.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 	
[Fotografía 11- Teatro Romea, Murcia.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/publicaciones_4355gx031.pdf CD:/Anexo1_ValoresExperimentales/ Nº11_TeatroRomeaMurcia	

Datos Técnicos			Dimensiones de la sala	
Capacidad	1.179 localidades		Altura (H)	14,5 m
Volumen sala	7070 m ³		Anchura (W)	17,6 m
Superficie audiencia	776,85 m ²		Longitud (L)	39,05 m
Superficie escenario	253,4 m ²			
Superficie	Material	Coeficiente de Difusión		
Suelo	[17],[4]	0,05		
Pared	[13]	0,05		
Audiencia	[6]	0,7		
Techo	[9]	0,2		
Escenario	[13]	0,05		

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
Nos dan los datos en condiciones de sala llena cuyas características acústicas para la sala en estado ocupado se han determinado a partir de los datos de variabilidad del coeficiente de absorción $\Delta\alpha$ entre butaca ocupada y butaca vacía, emitidos por Beranek.
- **RECEPTORES:** Mediciones en 8 posiciones de la sala. Barti (1995, 8 receptores).
- **FUENTE:** Escenario.
- **SEÑAL EMITIDA:** No se especifica.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala llena.
- **RECEPTORES:** Situados en 8 posiciones de la sala. Al azar equidistantes.
- **FUENTE:** 1,7 m sobre el escenario.

ESQUEMAS FUENTE Y RECEPTORES

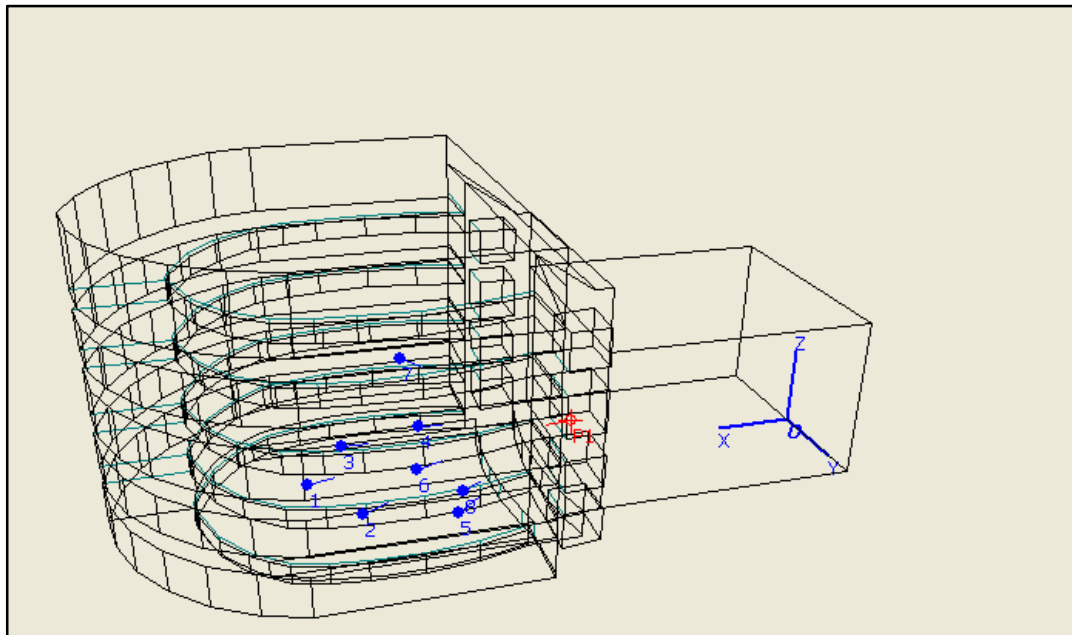


Fig. 50 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia ODEON



RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	0,9	1
Índice de Calidez (s)	1,06	2,49
Índice de Brillo (s)	0,88	0,51
EDT (s)	0,84	1,1
Claridad musical C_{80}	10,78	5,80

5.2.12 TEATRO VILLAMARTA - JEREZ DE LA FRONTERA

CÓDIGO	043
DESCRIPCIÓN	
<p>De estilo regionalista andaluz, el Teatro Villamarta de Jerez de la Frontera es obra de Teodoro Anasagasti, construido en 1926. En 1988 fue declarado Bien de Interés Cultural.</p> <p>Actualmente acoge dos importantes eventos de proyección exterior: Festival de Jerez y el Centro Lírico del Sur.</p> <p>La sala tiene un aforo total de 1200 localidades. Se reparten de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> Anfiteatro: 315 localidades. Plateas: 62 localidades. Patio de butacas: 581 localidades. Palcos: 56 localidades. Principal: 200 localidades. <p>La sala está decorada con maderas, tonos rojos y cenefas en tonos amarillos. Contiene dos lienzos de 1927 de Teodoro Miciano. Hay 5 lámparas de cristal.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 	
[Fotografía 12- Teatro Villamarta, Jerez de la Frontera.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/Nº12_TeatroVillamartaJerez	

Datos Técnicos	
Capacidad	1.200 localidades
Volumen sala	9248 m ³
Superficie audiencia	516,02 m ²
Superficie escenario	170,81 m ²

Dimensiones de la sala	
Altura (H)	14,55 m
Anchura (W)	22,8 m
Longitud (L)	32,19 m

Superficie	Material	Coefficiente de Difusión
Suelo	[18], [4]	0,05
Pared	[1], [9]	0,05
Audiencia	[5]	0,7
Techo	[9]	0,05
Escenario	[13]	0,05

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Mediciones en 18 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** Escenario.
- **SEÑAL EMITIDA:** No se especifica.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Situados en 18 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** Escenario.
- **OTRAS ESPECIFICACIONES:** Sin concha acústica (SC).

ESQUEMAS FUENTE Y RECEPTORES

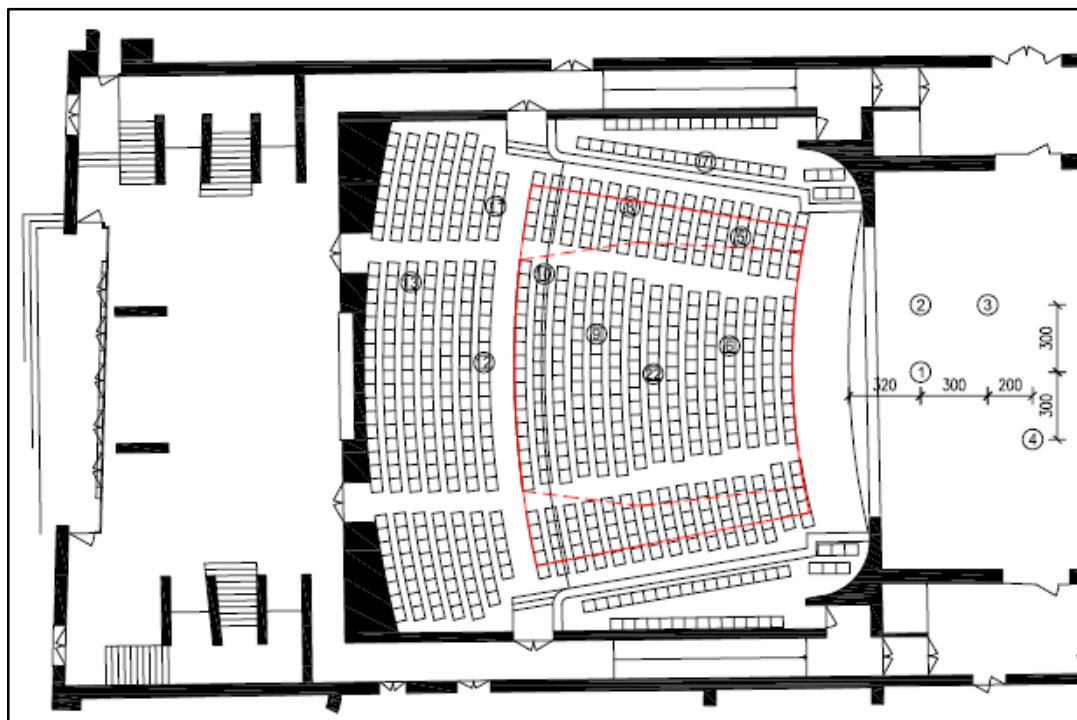


Fig. 51 Posición de fuente y receptores en el proceso de medida, PLANTA BAJA

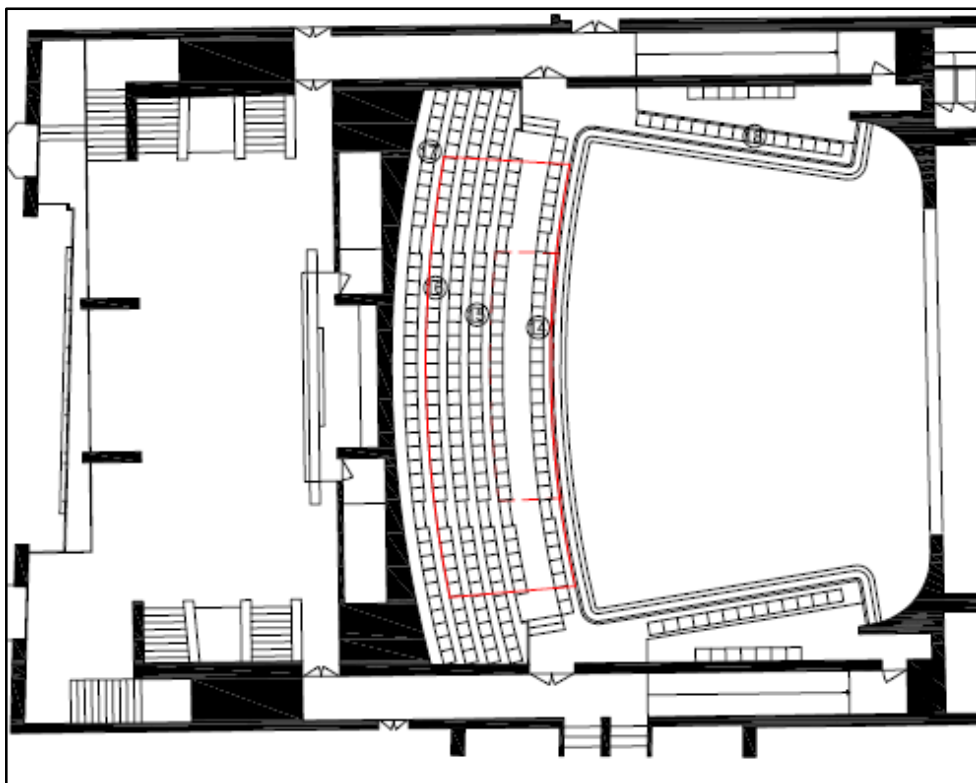


Fig. 52 Posición de fuente y receptores en el proceso de medida, PLANTA PRIMERA

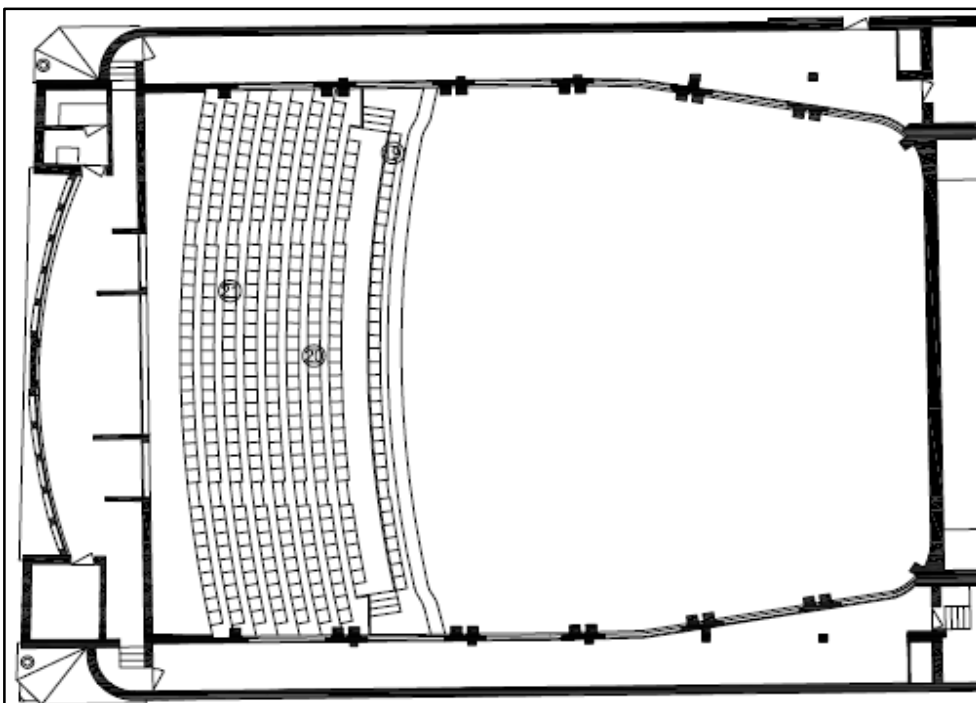


Fig. 53 Posición de fuente y receptores en el proceso de medida, PLANTA PRIMERA

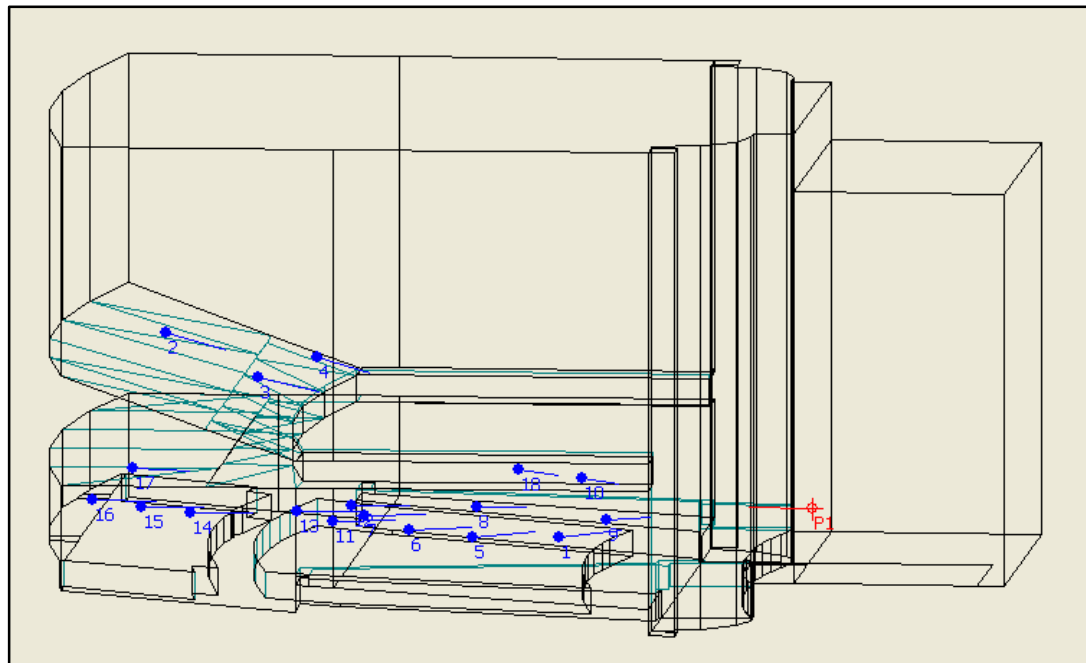


Fig. 54 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia ODEON.

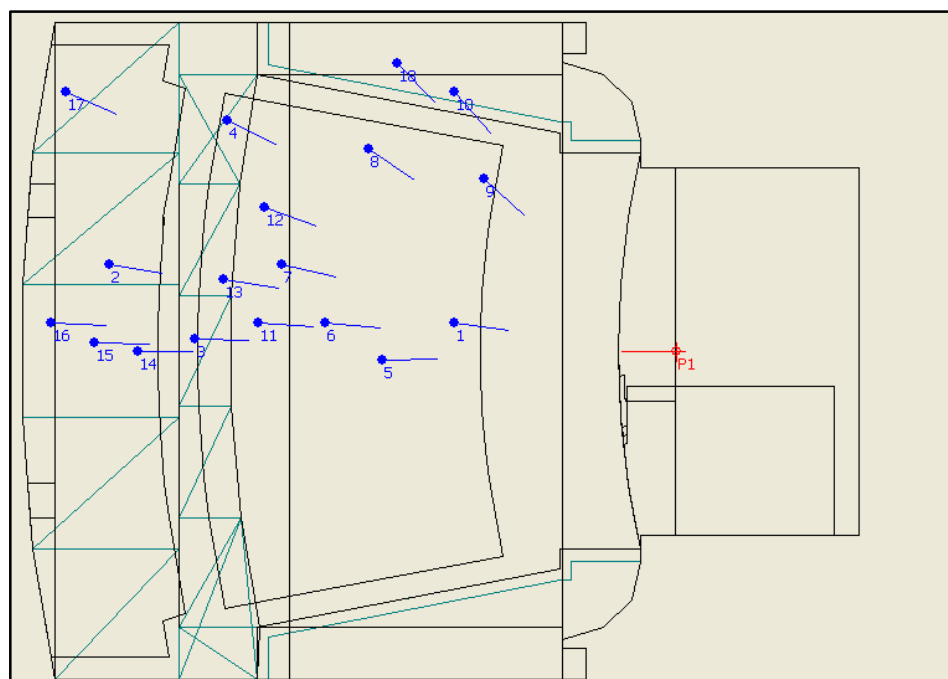


Fig. 55 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia ODEON.

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	1,82	2,10
Índice de Calidez (s)	1,13	1,4
Índice de Brillo (s)	0,89	0,75
EDT (s)	1,75	1,99
Claridad musical C_{80}	1,53	1,42
Claridad de la voz C_{50}	-0,79	-0,73

PLANOS

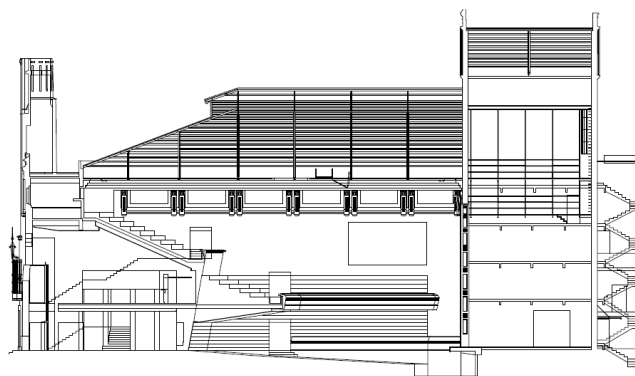
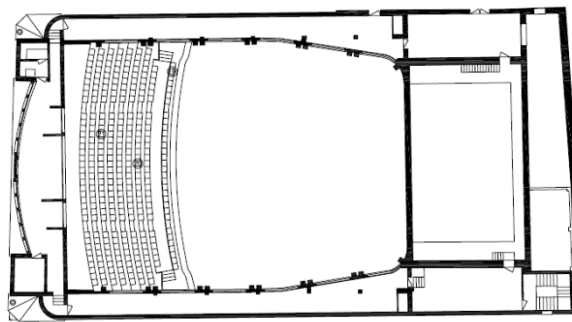


Fig. 56 Planta y sección teatro Villamarta, Jerez de la Frontera.

5.2.13 SALA PRINCIPAL. AUDITORIO CIUDAD DE LEÓN - LEÓN

CÓDIGO	045
DESCRIPCIÓN	
<p>El edificio fue diseñado por los arquitectos Emilio Tuñón y Luis Moreno Mansilla e inaugurado el 3 de mayo de 2002. El edificio, de 9.000 m² construidos, cuenta con tres plantas y se articula en dos volúmenes diferenciados en forma y funciones. El principal, acoge la sala de conciertos con capacidad para 1.200 personas.</p> <p>Ha sido galardonado con el <i>premio de arquitectura española</i> en 2003 y finalista en el año 2003 de los premios “Premio Mies van der Rohe” de Arquitectura Contemporánea de la Unión Europea y de la VII Bienal de Arquitectura Española.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 	
[Fotografía 13- Auditorio Ciudad de León.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Terrassa05_CI01.pdf - (pág. 55) CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/Nº4_AuditoriosSiglo21	

Datos Técnicos		
Capacidad		1.200 localidades
Volumen sala		12.229 m ³
Superficie audiencia		757,86 m ²
Superficie escenario		198,22 m ²

Dimensiones de la sala	
Altura (H)	14,48 m
Anchura (W)	19,6 m
Longitud (L)	54 m

Superficie	Material	Coefficiente de Difusión
Suelo	[1]	0,05
Pared	[1]	0,05
Audiencia	[8]	0,7
Techo	[1]	0,05
Escenario	[1]	0,05



PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

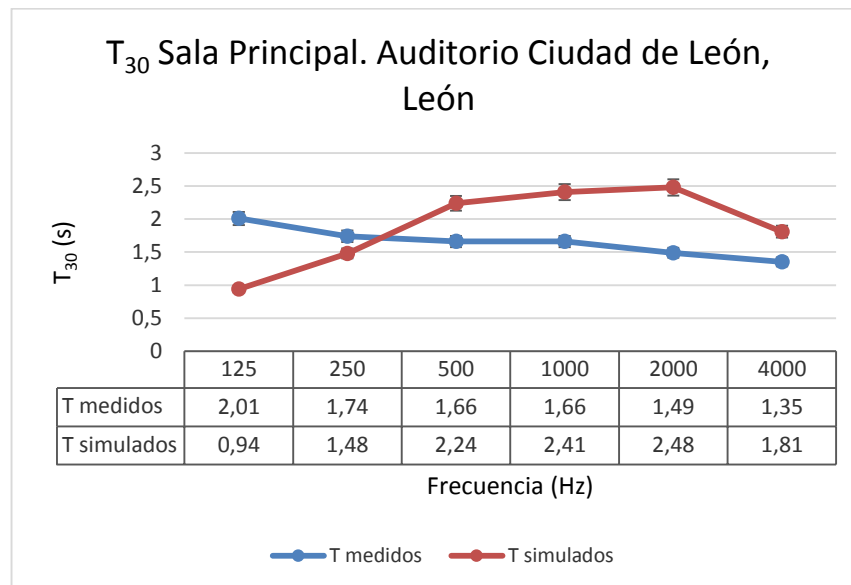
- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala llena.
- **RECEPTORES:** No se especifican.
- **FUENTE:** Escenario.
- **SEÑAL EMITIDA:** No se especifica.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala llena.
- **RECEPTORES:** No se especifican.
- **FUENTE:** Escenario.

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	1,66	2,33
Índice de Calidez (s)	1,13	0,52
Índice de Brillo (s)	0,86	0,92



Gráfica 12 Tiempos de reverberación por frecuencias

5.2.14 TEATRO GAYARRE - PAMPLONA

CÓDIGO	056
DESCRIPCIÓN	
<p>Se llamó Teatro Principal hasta 1903 y Teatro Gayarre a partir de entonces en memoria del tenor roncalés muerto en 1890. Desde el momento en el que el derribo de las murallas de la ciudad dio paso al ensanche de Pamplona, la vida del coliseo peligró hasta que se procedió a su demolición en 1931 y a su traslado al lugar donde hoy se encuentra, en la Avenida Carlos III de Pamplona.</p> <p>El interior del edificio consta de cuatro plantas. En la primera se encuentra el hall de entrada a la sala y la sala propiamente dicha, con un patio de butacas de 458 plazas de aforo. En esta misma planta se encuentra, además del escenario (y foso para orquestas), la zona de camerinos, dividida también en tres alturas.</p> <p>La segunda planta del edificio, con una capacidad de 78 localidades, acoge las plateas centrales de la sala. La tercera planta, el palco, consta de 174 localidades. El teatro aún tiene una cuarta planta, el anfiteatro, recuperada y abierta de nuevo al público tras las obras acometidas durante la primavera/verano de 2005 y dispone de un total de 118 butacas.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 	
[Fotografía 14- Teatro Gayarre, Pamplona.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/ Nº13_TeatroGayarrePamplona	

Datos Técnicos			Dimensiones de la sala	
Capacidad	1.063 localidades		Altura (H)	15,3 m
Volumen sala	5.769 m ³		Anchura (W)	20,7 m
Superficie audiencia	621,32 m ²		Longitud (L)	28,59 m
Superficie escenario	133,26 m ²			
Superficie	Material	Coficiente de Difusión		
Suelo	[17]	0,05		
Pared	[9]	0,25		
Audiencia	[5]	0,7		
Techo	[9]	0,05		
Escenario	[13]	0,05		

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Mediciones en 12 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** Fuente S1. No se especifica situación exacta.
- **SEÑAL EMITIDA:** No se especifica.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Situados en 12 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** Escenario.

ESQUEMAS FUENTE Y RECEPTORES

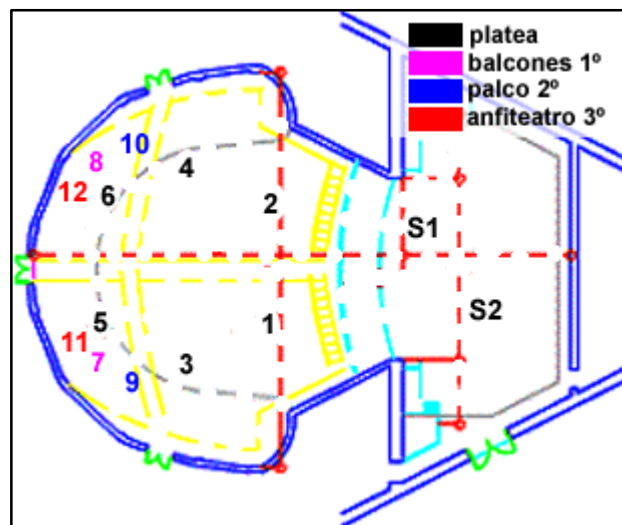


Fig. 57 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia en el proceso de medida.

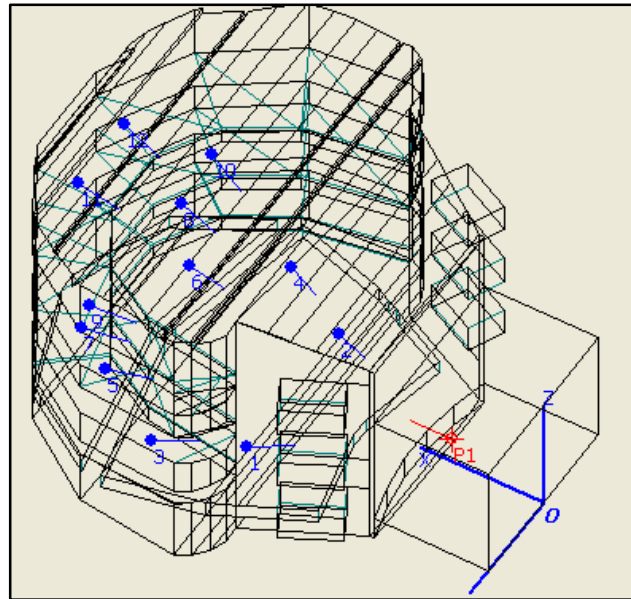


Fig. 58 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia en el proceso de medida

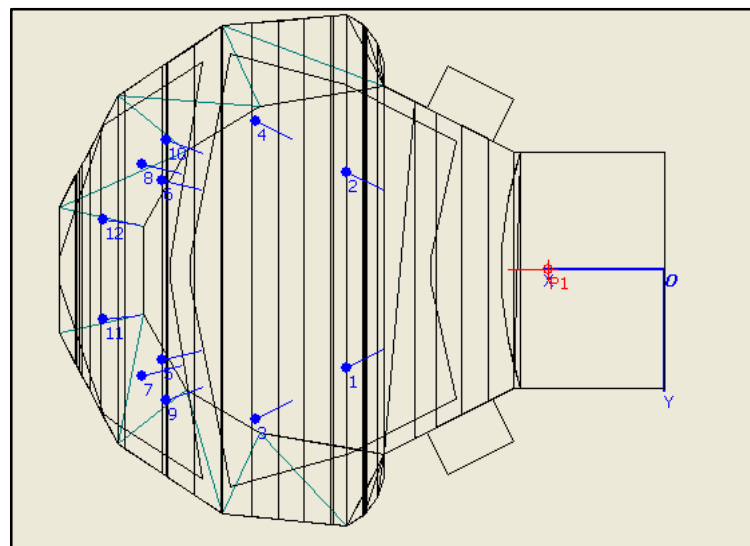
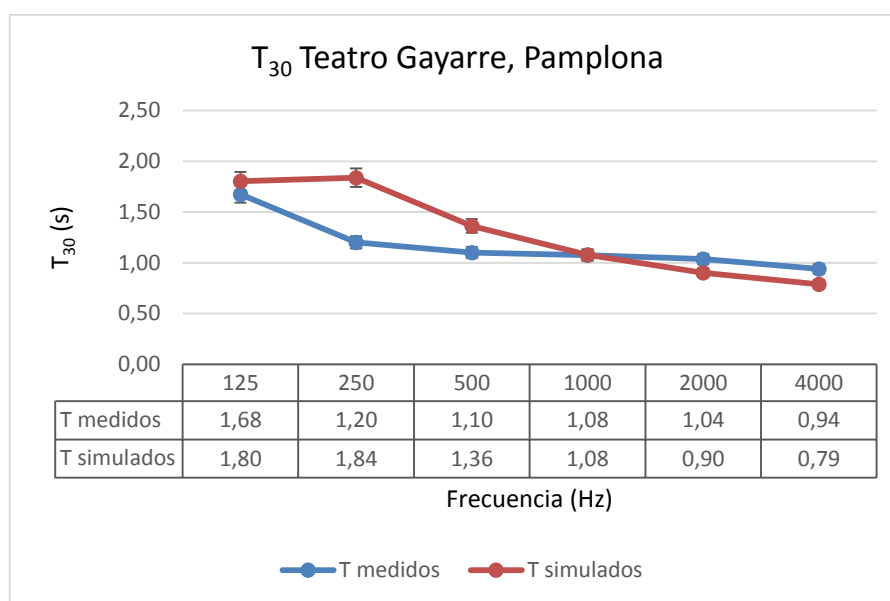


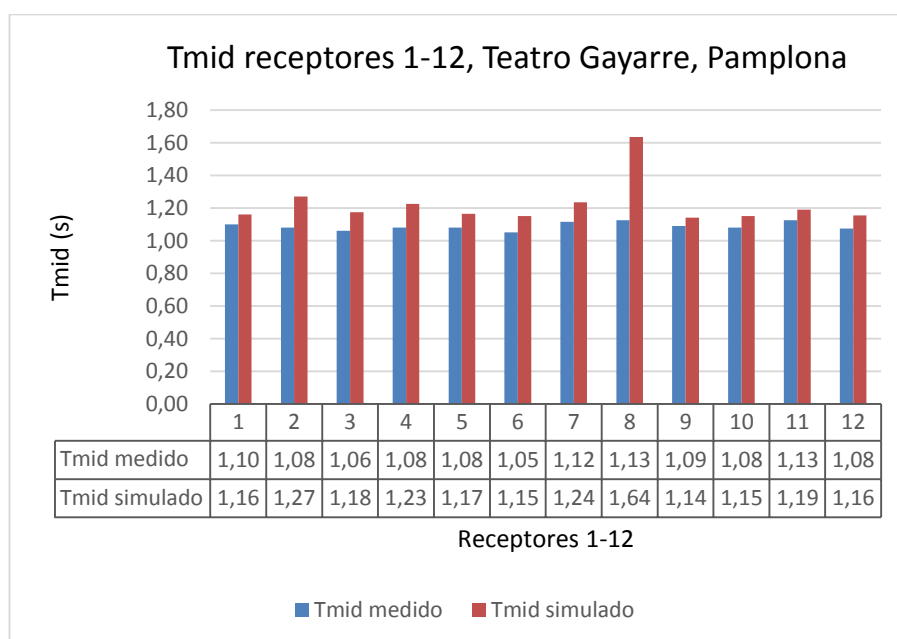
Fig. 59 Planta. Posición de fuente y receptores en el área de audiencia en el proceso de medida

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	1,09	1,22
Índice de Calidez (s)	1,32	1,49
Índice de Brillo (s)	0,91	0,69
EDT (s)	0,99	1,13
Claridad musical C_{80}	4,39	4,49
Claridad de la voz C_{50}	1,54	2,53



Gráfica 13 Tiempos de reverberación por frecuencias



Gráfica 14 Tiempos de reverberación por receptor

5.2.15 TEATRO MIGUEL DE CERVANTES - MÁLAGA

CÓDIGO	057
DESCRIPCIÓN	
<p>El Teatro Cervantes de la ciudad española de Málaga es el más antiguo espacio escénico de la capital de la Costa del Sol, data de 1870 y cuenta con mil doscientas localidades. Es la sede principal del Festival de Málaga.</p> <p>El Teatro fue construido en el año 1869 tras la destrucción en un incendio del Teatro del Príncipe Alfonso, que fue como se denominó al antiguo Teatro de la Merced tras la visita que en el año 1862 realizó a la ciudad la reina Isabel II. Después de aquel desgraciado suceso se decide la construcción de un nuevo teatro bajo la dirección del arquitecto Jerónimo Cuervo, que fue inaugurado en 1870 como Teatro Cervantes.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
	
[Fotografía 15- Teatro Miguel de Cervantes. Málaga.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/ N°14_TeatroCervantesMalaga	

Datos Técnicos	
Capacidad	1.058 localidades
Volumen sala	8.601 m ³
Superficie audiencia	894,7 m ²
Superficie escenario	135,65 m ²

Dimensiones de la sala	
Altura (H)	21,11 m
Anchura (W)	21,16 m
Longitud (L)	45,39 m

Superficie	Material	Coefficiente de Difusión
Suelo	[17]	0,05
Pared	[9], [13]	0,1 ; 0,05
Audiencia	[5]	0,7
Techo	[9]	0,05
Escenario	[1]	0,05

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Mediciones en 15 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** Fuente S1. No se especifica situación exacta.
- **SEÑAL EMITIDA:** No se especifica.
- **OTRAS ESPECIFICACIONES:** Sin concha acústica (SC).

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala vacía.
- **RECEPTORES:** Situados en 15 posiciones de la sala.
- **FUENTE:** Escenario.

ESQUEMAS FUENTE Y RECEPTORES

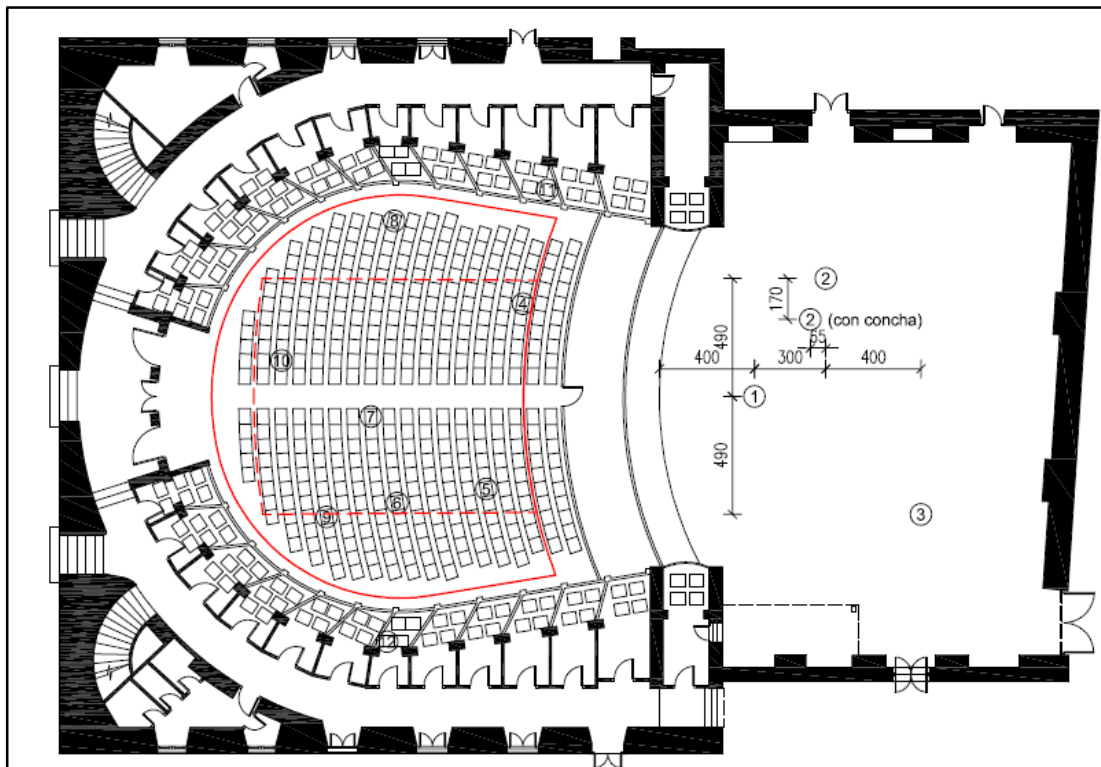


Fig. 60 Posición de fuente y receptores en el proceso de medida, PLANTA BAJA.

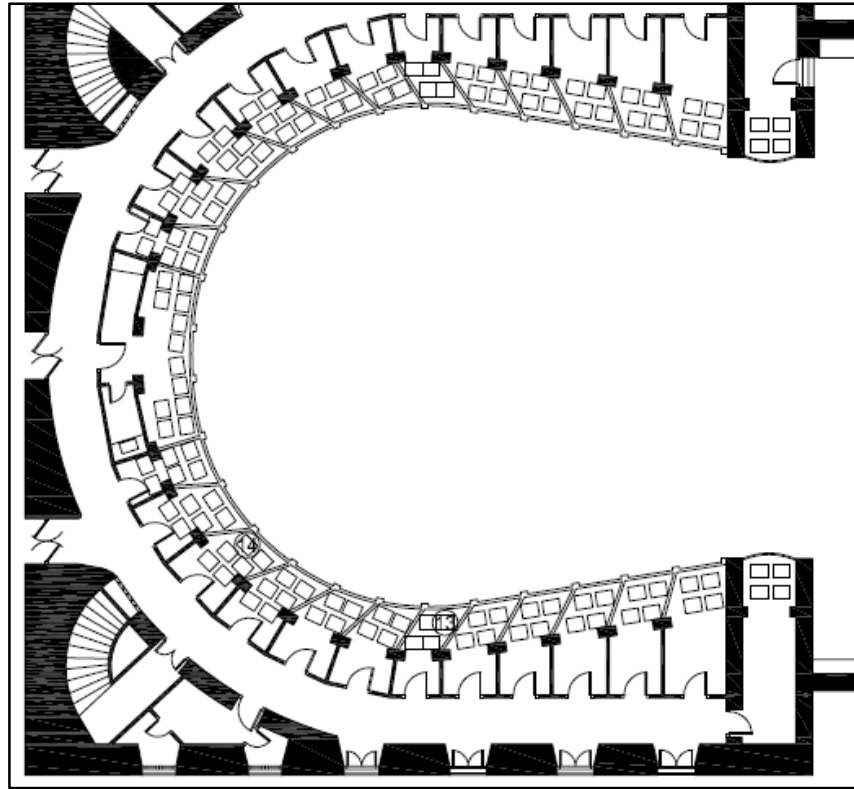


Fig. 61 Posición de fuente y receptores en el proceso de medida, PLANTA PRIMERA

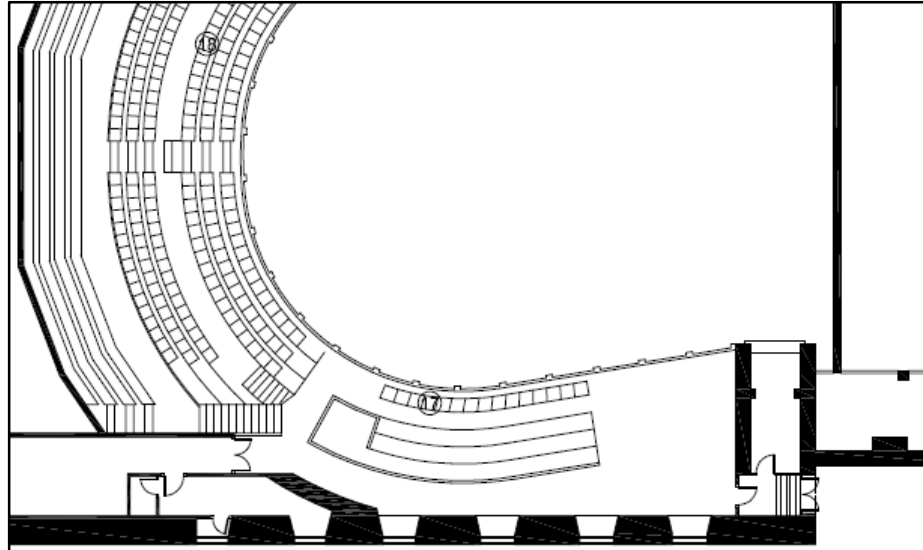


Fig. 62 Posición de fuente y receptores en el proceso de medida, PLANTA SEGUNDA

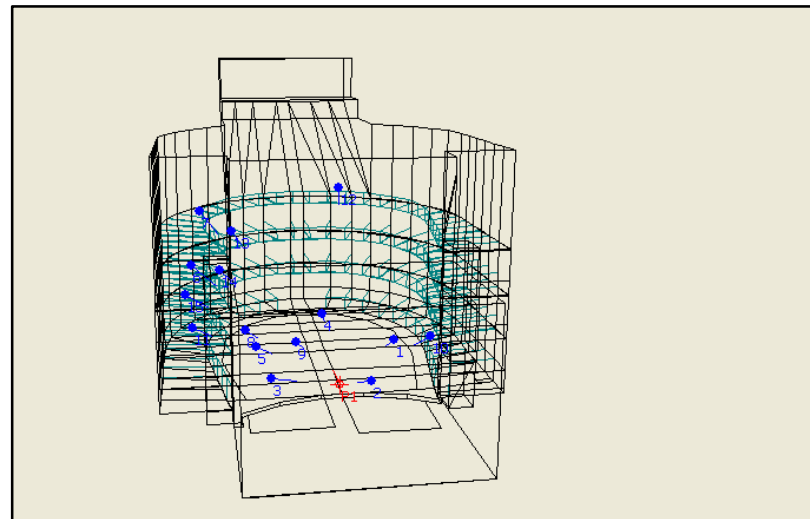
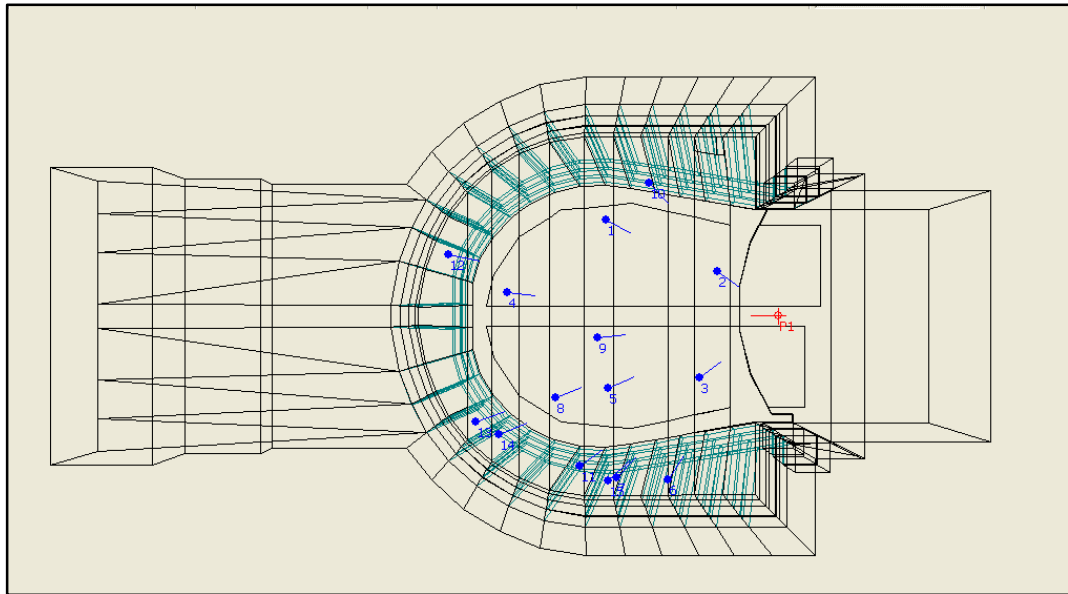


Fig. 63 Posición de fuente y receptores en el área de audiencia en el proceso de medida.

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	1,23	1,78
Índice de Calidez (s)	1,33	0,93
Índice de Brillo (s)	0,82	0,85
EDT (s)	1,09	1,69
Claridad musical C_{80}	4,36	0,31
Claridad de la voz C_{50}	1,79	-2,35

PLANOS

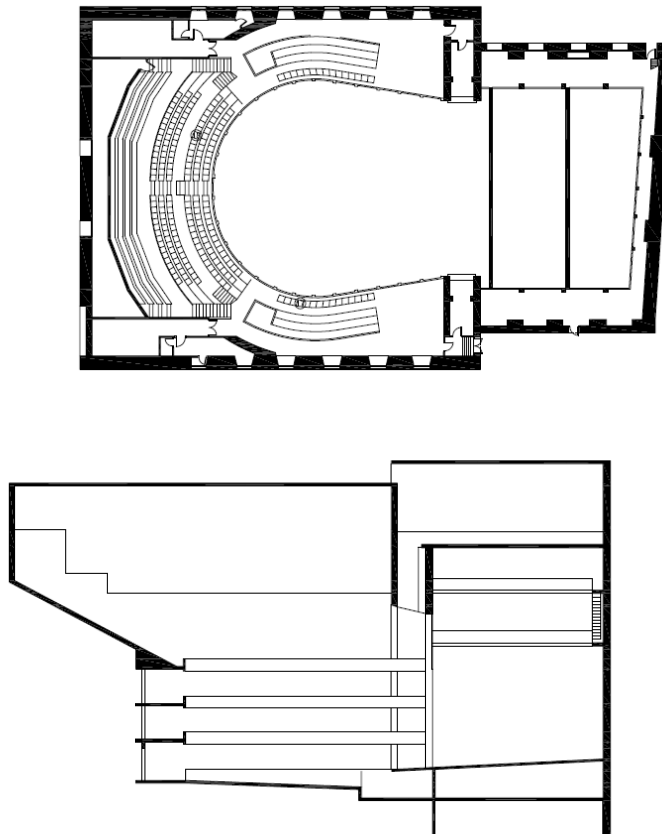


Fig. 64 Teatro Miguel de Cervantes, Málaga

5.2.16 SALA BUERO VALLEJO - GUADALAJARA

CÓDIGO	069
DESCRIPCIÓN	
<p>El Teatro Auditorio Buero Vallejo es un teatro y auditorio público de Guadalajara. Fue construido entre 1998 y 2002 en el centro de la ciudad, junto al Campus Universitario, con un coste final de 9.738.316 €.</p> <p>Recibió el nombre de Buero Vallejo en homenaje al dramaturgo guadalajareño.</p> <p>El edificio ocupa un espacio de 9.320 m² y la sala principal consta de un aforo de 1.003 butacas, repartidos en un patio central o platea, dos anfiteatros laterales y un anfiteatro posterior, un escenario de 465 m² y un foso para orquesta.</p>	
FOTOGRAFÍAS	
 	
[Fotografía 16- Sala buero Vallejo - Guadalajara.]	
ENLACES: VALORES CORRESPONDIENTES A LAS MEDIDAS REALIZADAS	
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Terrassa05_CI01.pdf – (pág 65) CD:/AnexoI_ValoresExperimentales/ N°4_AuditoriosSiglo21	

Datos Técnicos			Dimensiones de la sala	
Capacidad	1.003 localidades		Altura (H)	13,30 m
Volumen sala	9.320 m ³		Anchura (W)	27,20 m
Superficie audiencia	547,75 m ²		Longitud (L)	47,29 m
Superficie escenario	385,46 m ²			
Superficie	Material	Coeficiente de Difusión		
Suelo	[4]	0,05		
Pared	[3]	0,05		
Audiencia	[6]	0,7		
Techo	[1]	0,05		
Escenario	[13]	0,05		



PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

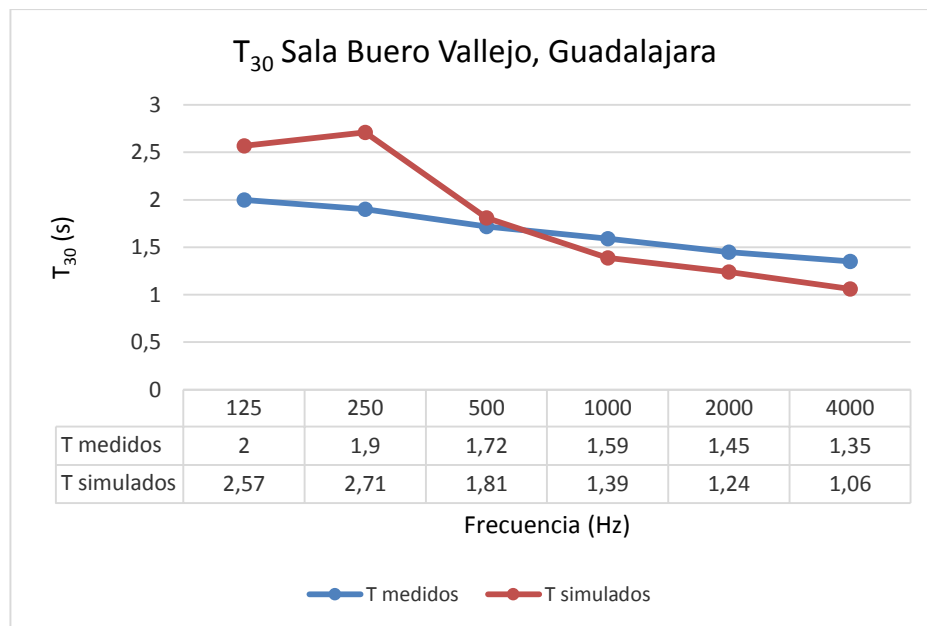
- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala llena.
- **RECEPTORES:** No se especifican.
- **FUENTE:** Escenario.
- **SEÑAL EMITIDA:** No se especifica.
- **OTRAS ESPECIFICACIONES:** Utilizamos datos configuración concierto, no ópera.

PROCEDIMIENTO SIMULACIÓN ACÚSTICA

- **CONDICIONES DE LA SALA:** Condiciones de sala llena.
- **RECEPTORES:** No se especifican.
- **FUENTE:** No se especifica.

RESULTADOS POR PARÁMETROS

Parámetro Acústico	Medido	Simulado
Tiempo de Reverberación T_{mid} (s)	1,66	1,6
Índice de Calidez (s)	1,18	1,65
Índice de Brillo (s)	0,85	0,72



Gráfica 15 Tiempos de reverberación por frecuencias

6. ANÁLISIS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

Para valorar las características geométricas de los recintos, en acústica de sala se utilizan una serie de parámetros que relacionan entre sí las magnitudes geométricas de los recintos. Estas relaciones sirven para establecer un determinado criterio a la hora de diseñar un recinto.

Existe la creencia de que las salas con una capacidad inferior tienen mejor acústica que las salas de mayor capacidad. O si se habla de volumen, se podría hacer la misma relación. Esto es porque previos estudios de las salas mejor valoradas acústicamente y de las peor valoradas coinciden en que las de menor aforo y volumen son las que tienen mejor acústica. También existen razones que apoyan esta idea basadas en los siguientes hechos: Mayor intimidad acústica, distancia más corta entre el espectador más alejado y la fuente en el escenario, mayor energía asociada a las reflexiones laterales y mayor grado de impresión espacial. Sin embargo, este razonamiento no es siempre cierto, sino que también intervienen otras relaciones geométricas en el diseño que influyen en la calidad acústica de la sala. Actualmente dados los conocimientos de acústica es posible diseñar salas de grandes dimensiones con una gran calidad acústica a base de neutralizar sus potenciales efectos negativos mediante ingeniosas construcciones [1].

Hemos extraído información sobre los valores de parámetros geométricos de diferentes salas del mundo. Se puede encontrar en el libro de L. Beranek “Concert and Opera Halls: How They Sound” y en el libro de A. Carrión “Diseño acústico de espacios arquitectónicos” [1].

Las salas aparecen clasificadas de acuerdo con las siguientes seis categorías:

- Categoría A+ : “Superior”
- Categoría A : “Excelente”
- Categoría B+ : “Buena a Excelente”
- Categoría B : “Buena”
- Categoría C+ : “Aceptable a Buena”
- Categoría C : “Aceptable”

Las salas pertenecientes a cada categoría están ordenadas por orden alfabético, llegando a ser un total de 66 salas de conciertos. Recopilamos la información en la Tabla 2.

En la Tabla 2 y Tabla 3 se recogen los valores de las magnitudes geométricas de cada recinto estudiado por Beranek y recintos españoles respectivamente, cuyas nomenclaturas son las siguientes:

- N: Aforo de la sala.
- V: Volumen de la sala (m^3).
- S_A : Superficie que ocupa la zona de la audiencia (m^2).
- S_o : Superficie que ocupa la zona del escenario (m^2).
- V/N : Relación entre el volumen de la sala y el número de plazas.
- V/S_A : Relación entre el volumen de la sala y la superficie de la audiencia.
- S_A/N : Relación entre la superficie de la audiencia y el número de plazas.



PARÁMETROS SALAS BERANEK

CATEG.	NOMBRE RECINTO	Fecha	N	V	S _a	S _o	S _{tot}	Parámetros geométricos			
			Aforo	Vol. (m ³)	S _{audiencia} (m ²)	S _{escenario} (m ²)	S _{tot} (m ²)	V/N	V/S _A	S _A /N	V/S _{tot}
A+	Amsterdam, Concertgebouw	1.888	2.037	18.780	1.125	160	1.285	9,22	16,69	0,55	14,61
A+	Boston, Symphony Hall	1.900	2.625	18.750	1.370	152	1.522	7,14	13,69	0,52	12,32
A+	Vienna, Musikvereinssaal	1.870	1.680	15.000	955	163	1.118	8,93	15,71	0,57	13,42
A	Basel, Stadt-Casino	1.876	1.448	10.500	731	160	891	7,25	14,36	0,50	11,78
A	Berlin, Konzerthaus (Schauspiel)	1.986	1.575	15.000	943	158	1.101	9,52	15,91	0,60	13,62
A	Cardiff, Wales, St. David's Hall	1.982	1.952	22.000	1.235	186	1.421	11,27	17,81	0,63	15,48
A	Costa Mesa, Segerstrom Hall	1.986	2.903	27.800	1.742	223	1.965	9,58	15,96	0,60	14,15
A	New York, Carnegie Hall	1.891	2.804	24.270	1.600	227	1.826	8,66	15,17	0,57	13,29
A	Tokyo, Hamarikyū Asahi	1.992	552	5.800	395	73	468	10,51	14,68	0,72	12,39
A	Zurich, Grosser Tonhalleaal	1.895	1.546	11.400	877	145	1.022	7,37	13,00	0,57	11,15
B+/B	Baltimore, Meyerhoff Hall	1.982	2.467	21.520	1.486	186	1.672	8,72	14,48	0,60	12,87
B+/B	Berlin, Kammermusiksaal	1.987	1.138	11.000	829	78	907	9,67	13,27	0,73	12,13
B+/B	Berlin, Philharmonie	1.963	2.335	21.000	1.385	172	1.557	8,99	15,16	0,59	13,49
B+/B	Birmingham, Symphony Hall	1.991	2.211	25.000	1.320	279	1.599	11,31	18,94	0,60	15,63
B+/B	Bonn, Beethovenhalle	1.959	1.407	15.730	115	204	319	11,18	136,78	0,08	49,31
B+/B	Bristol, Colston Hall	1.951	2.121	13.450	987	160	1.147	6,34	13,63	0,47	11,73
B+/B	Brussels, Palais des Beaux-Arts	1.929	2.150	12.520	1.300	186	1.486	5,82	9,63	0,60	8,43
B+/B	Budapest, Pátria Hall	1.985	1.750	13.400	1.286	156	1.442	7,66	10,42	0,73	9,29
B+/B	Caracas, Aula Magna	1.954	2.660	24.920	1.886	204	2.090	9,37	13,21	0,71	11,92
B+/B	Christchurch, N.Z., Town Hall	1.972	2.662	20.500	1.416	194	1.610	7,70	14,48	0,53	12,73
B+/B	Cleveland, Severance Hall	1.931	2.101	15.690	1.208	186	1.394	7,47	12,99	0,57	11,26
B+/B	Copenhagen, Radiohuset, Studio 1	1.945	1.081	11.900	721	288	1.009	11,01	16,50	0,67	11,79



B+/B	Copenhagen, Tivoli Koncertsal	1.956	1.789	12.740	1.136	195	1.331	7,12	11,21	0,63	9,57
B+/B	Dallas, McDermott/Meyerson Hall	1.989	2.065	23.900	1.210	250	1.460	11,57	19,75	0,59	16,37
B+/B	Edinburgh, Usher Hall	1.914	2.547	15.700	1.338	120	1.458	6,16	11,73	0,53	10,77
B+/B	Glasgow, Royal Concert Hall	1.990	2.459	22.700	1.365	218	1.583	9,23	16,63	0,56	14,34
B+/B	Gothenburg, Konserthus	1.935	1.286	11.900	666	170	836	9,25	17,87	0,52	14,23
B+/B	Helsinki, Kulttuuritalo	1.957	1.500	10.025	946	166	1.112	6,68	10,60	0,63	9,02
B+/B	Jerusalem, Binyanei Ha'Oomah	1.960	3.142	24.700	2.137	260	2.397	7,86	11,56	0,68	10,30
B+/B	Leipzig, Gewandhaus	1.981	1.900	21.000	1.197	181	1.378	11,05	17,54	0,63	15,24
B+/B	Lenox, Seiji Ozawa Hall	1.994	1.180	11.610	739	202	941	9,84	15,71	0,63	12,34
B+/B	Lenox, Tanglewood Music Shed	1.938	5.121	42.480	2.861	204	3.065	8,30	14,85	0,56	13,86
B+/B	Liverpool, Philharmonic Hall	1.939	1.824	13.560	1.291	130	1.421	7,43	10,50	0,71	9,54
B+/B	London, Royal Festival Hall	1.951	2.901	21.950	1.972	173	2.145	7,57	11,13	0,68	10,23
B+/B	Manchester, Free Trade Hall	1.951	2.351	15.430	1.375	100	1.475	6,56	11,22	0,58	10,46
B+/B	Mexico City, Sala Nezahualcoyotl	1.976	2.376	30.640	1.684	270	1.954	12,90	18,19	0,71	15,68
B+/B	Minneapolis, Minn. Orch. Hall	1.974	2.450	18.975	1.574	203	1.777	7,74	12,06	0,64	10,68
B+/B	Munich, Herkulesaal	1.953	1.287	13.590	674	168	842	10,56	20,16	0,52	16,14
B+/B	Munich, Philharmonie Am Gasteig	1.985	2.487	29.700	1.639	230	1.869	11,94	18,12	0,66	15,89
B+/B	New York, Avery Fisher Hall	1.976	2.742	20.400	1.480	203	1.683	7,44	13,78	0,54	12,12
B+/B	Osaka, Symphony Hall	1.982	1.702	17.800	1.236	285	1.521	10,46	14,40	0,73	11,70
B+/B	Paris, Salle Pléyel	1.927	2.386	15.500	1.058	242	1.300	6,50	14,65	0,44	11,92
B+/B	Rochester, Eastman Theatre	1.923	3.347	25.500	1.907	204	2.225	7,62	13,37	0,57	11,46
B+/B	Rotterdam, De Doelen Concert Hall	1.966	2.242	24.070	1.509	195	1.704	10,74	15,95	0,67	14,13
B+/B	Salt Lake, Utah, Symphony Hall	1.979	2.812	19.500	1.669	218	1.887	6,93	11,68	0,59	10,33
B+/B	Salzburg, Festspielhaus	1.960	2.158	15.500	1.375	195	1.570	7,18	11,27	0,64	9,87
B+/B	Stuttgart, Liederhalle	1.956	2.000	16.000	1.300	176	1.476	8,00	12,31	0,65	10,84
B+/B	Sydney Opera House, Concert Hall	1.973	2.679	24.600	1.563	181	1.744	9,18	15,74	0,58	14,11
B+/B	Taipei, Concert Hall Auditorium	1.987	2.074	16.700	1.261	269	1.530	8,05	13,24	0,61	10,92
B+/B	Tokyo, Bunka Kaikan, Ueno	1.961	2.327	17.300	1.301	241	1.542	7,43	13,30	0,56	11,22



B+/B	Tokyo, Metropolitan Art Space	1.990	2.017	25.000	1.312	207	1.519	12,39	19,05	0,65	16,46
B+/B	Tokyo, NHK Hall	1.973	3.677	25.200	1.821	193	2.014	6,85	13,84	0,50	12,51
B+/B	Tokyo, Orchard Hall, Bunkamura	1.989	2.150	20.500	1.314	217	1.531	9,53	15,60	0,61	13,39
B+/B	Tokyo, Suntory Hall	1.986	2.006	21.000	1.364	235	1.599	10,47	15,40	0,68	13,13
B+/B	Toronto, Roy Thompson Hall	1.982	2.812	28.300	1.681	222	1.903	10,06	16,84	0,60	14,87
B+/B	Washington, Kennedy Concert Hall	1.971	2.759	19.300	1.289	109	1.398	7,00	14,97	0,47	13,81
B+/B	Worcester, Mechanics Hall	1.857	1.343	10.760	701	154	855	8,01	15,35	0,52	12,58
B	Chicago, Orchestra Hall	1.904	2.582	18.000	1.672	186	1.858	6,97	10,77	0,65	9,69
B	Edmonton, Alberta Jubilee Hall	1.957	2.678	21.500	1.951	186	2.137	8,03	11,02	0,73	10,06
B	Montreal, Salle Wilfrid-Pelletier	1.963	2.982	26.500	1.767	172	1.939	8,89	15,00	0,59	13,67
B	San Francisco, Davies Hall	1.980	2.743	24.070	1.562	200	1.762	8,78	15,41	0,57	13,66
B	Tel Aviv, Fredric Mann Auditorium	1.957	2.715	21.240	1.700	195	1.895	7,82	12,49	0,63	11,21
C+	Bloomington, Indiana Univ. Aud.	1.941	3.760	26.900	2.438	186	2.624	7,15	11,03	0,65	10,25
C+	Buffalo, Kleinhans Music Hall	1.940	2.839	18.240	1.951	205	2.156	6,42	9,35	0,69	8,46
C+	London, Barbican Concert Hall	1.982	2.026	17.750	1.326	160	1.486	8,76	13,39	0,65	11,94
C	London, Royal Albert Hall	1.871	5.080	86.650	3.512	176	3.688	17,06	24,67	0,69	23,50

Tabla 2 Magnitudes geométricas acústica de salas estudiadas por Beranek



PARÁMETROS SALAS ESPAÑOLAS

			Fecha	N	V	S _a	S _o	S _{tot}	Parámetros geométricos			
	Cod.	NOMBRE RECINTO		Aforo	Vol. (m ³)	S _{audiencia} (m ²)	S _{escenario} (m ²)	S _{tot} (m ²)	V/N	V/S _A	S _A /N	V/Stot
Nº1	002	Auditorio Nacional de Música - Madrid	1988	2324	28743	1777	146	1923	12,37	16,18	0,76	14,95
Nº2	003	Gran Teatre del Liceu - Barcelona	1847	2321	12997	1390	198	1588	5,60	9,35	0,60	8,18
Nº3	005	Auditorio - Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música - Bilbao	1999	2165	29271	1631	319	1950	13,52	17,95	0,75	15,01
Nº4	007	Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe - Oviedo	1999	2100	15606	1162	328	1490	7,43	13,43	0,55	10,47
Nº5	009	Sala Mozart - Auditorio-Palacio de Congresos - Zaragoza	1994	1992	23245	1593	209	1802	11,67	14,59	0,80	12,90
Nº6	012	Auditorio - Centro Kursaal - San Sebastián/Donostia	1999	1806	14779	813	307	1120	8,18	18,18	0,45	13,20
Nº7	017	Auditorio Alfredo Kraus - Las Palmas de Gran Canaria	1998	1646	18701	1044	251	1295	11,36	17,91	0,63	14,44
Nº8	021	Baluart. Palacio de Congresos y Audit. de Navarra - Pamplona	2003	1568	16799	961	151	1112	10,71	17,48	0,61	15,11
Nº9	033	Auditorio Manuel de Falla - Granada	1978	1313	11895,27	754,6	178,24	932,84	9,06	15,76	0,57	12,75
Nº10	039	Gran Teatro Falla - Cádiz	1871	1214	10472,94	601,62	295,81	897,43	8,63	17,41	0,50	11,67
Nº11	040	Teatro Romea - Murcia	1862	1204	7070,96	776,85	253,4	1030,25	5,87	9,10	0,65	6,86
Nº12	043	Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera	1926	1200	9248,02	516,02	170,81	686,83	7,71	17,92	0,43	13,46
Nº13	045	Sala Principal, Auditorio Ciudad de León - León	2001	1150	12229,99	757,86	198,22	956,08	10,63	16,14	0,66	12,79
Nº14	056	Teatro Gayarre - Pamplona	1841	1063	5769,01	621,32	133,26	754,58	5,43	9,29	0,58	7,65
Nº15	057	Teatro Miguel de Cervantes - Málaga	1870	1058	8601,16	894,7	135,65	1030,35	8,13	9,61	0,85	8,35
Nº16	069	Sala Buero Vallejo - Guadalajara	2002	1003	12118,59	547,75	385,46	933,21	12,08	22,12	0,55	12,99

Tabla 3 Magnitudes geométricas acústica de salas españolas estudiadas

En las Fig. 65, Fig. 66 y Fig. 67 se representan los valores de la relación entre el volumen y el aforo (V/N), el volumen y la superficie de la audiencia (V/S_A), y de la superficie de la audiencia y el aforo (S_A/N) respectivamente de los recintos estudiados españoles y los estudiados por Beranek. Se representa también la recta asociada a dichos valores y su expresión matemática así como los coeficientes de correlación al cuadrado.

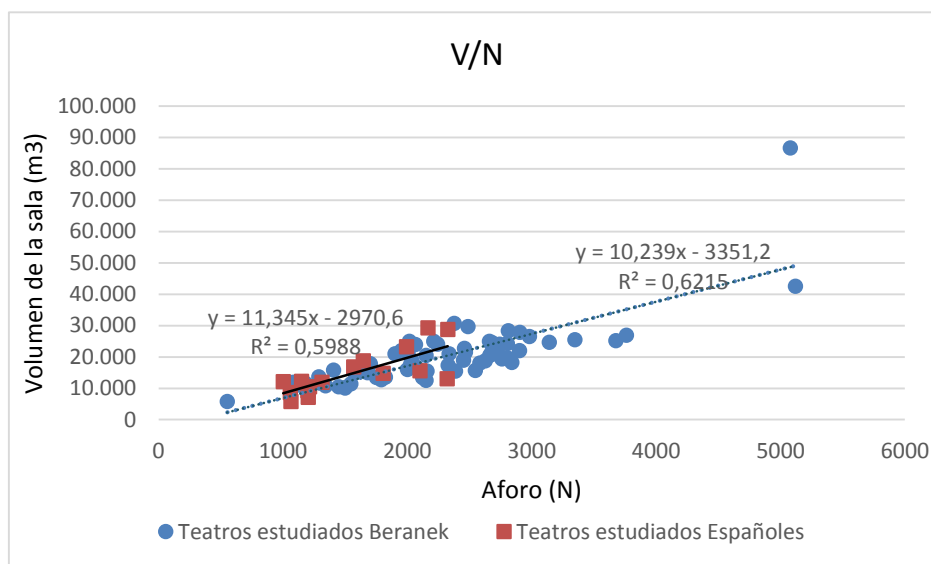


Fig. 65 Representación relación V/N en los recintos españoles y los estudiados por Beranek. $r^2=0,5988$; $r = 0,77$; $r^2= 0,62$; $r = 0,79$

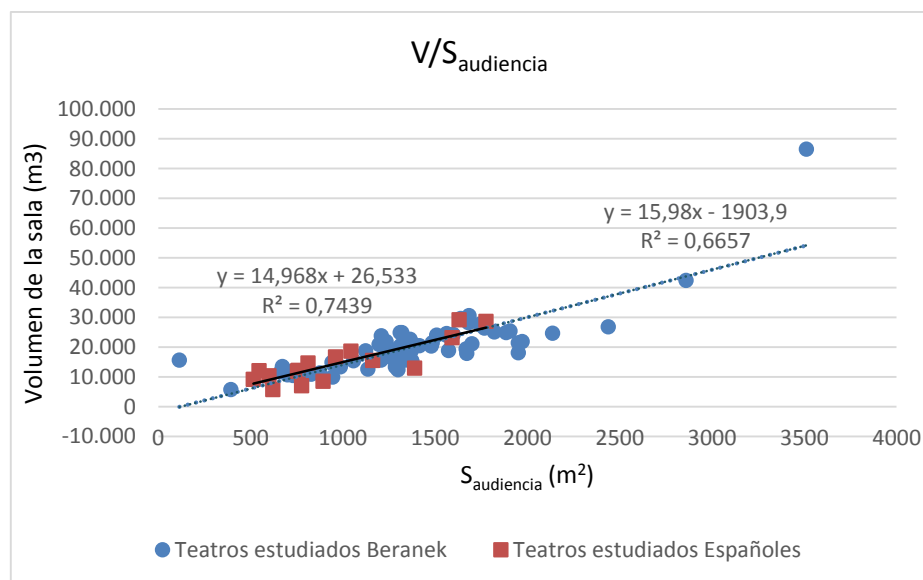


Fig. 66 Representación relación V/S_A en los recintos españoles y los estudiados por Beranek. $r^2=0,74$; $r = 0,86$; $r^2= 0,66$; $r=0,82$

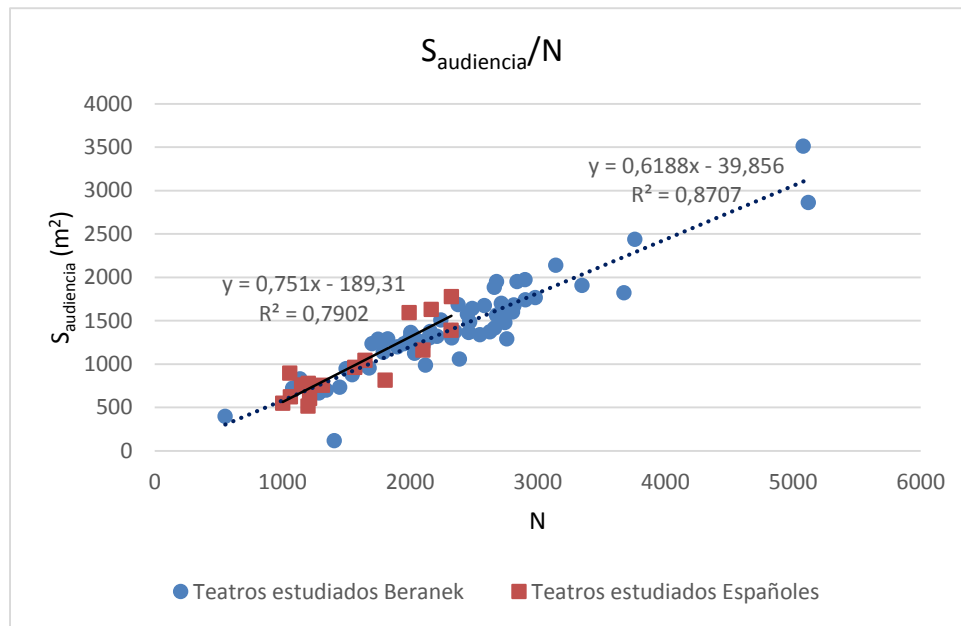


Fig. 67 Representación relación S_A/N en los recintos españoles y los estudiados por Beranek. $r^2=0,79$ $r=0,89$; $r^2=0,87$; $r=0,93$

En la Fig. 65 y Fig. 66 se aprecia que las rectas de regresión para las relaciones V/N y V/S_A en los recintos españoles y los estudiados por Beranek tienen una pendiente muy similar, por lo que podemos afirmar que las proporciones de nuestros recintos respecto el volumen y el número de localidades y las proporciones respecto el volumen y la superficie acústica de la audiencia son buenas. En la Fig. 67 las pendientes no son tan similares por lo que la relación $S_{audiencia}/N$ de los recintos españoles no son tan iguales a los estudiados por Beranek, pero es tan ligera la variación que podemos dar por buenas también las proporciones.

En la Fig. 65, fijándonos en los valores del coeficiente de correlación lineal, $r = 0,79$, en los recintos estudiados por Beranek y, $r = 0,77$ en los recintos españoles estudiados, se puede observar que la correlación entre las dos variables es alta en ambos casos.

En la Fig. 66 los valores de correlación lineal son $r = 0,86$ en los recintos estudiados por Beranek y $r = 0,82$ en los recintos españoles, por lo que la correlación entre las variables volumen y superficie acústica de la audiencia es alta en los dos casos.

En la Fig. 67 los valores del coeficiente de correlación lineal, $r = 0,89$ para los recintos españoles estudiados y $r = 0,93$ en los recintos estudiados por Beranek, por lo que, la correlación también es alta en ambos casos.

Las rectas son crecientes (correlación positiva) en todos los casos por lo que al aumentar una variable la otra también tiene tendencia a aumentar. Y la dependencia funcional en general entre las variables es fuerte en todos los casos.

6.1 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS SEGÚN EL TIPO DE SALA

En este apartado vamos a estudiar los parámetros geométricos en función del tipo de recinto estudiado en este trabajo.

Distinguimos dos tipos de salas: Auditorios y Teatros. Cuyas breves definiciones están dadas a continuación:

- **TEATRO**

(Del griego θέατρον, *theatrón* o «lugar para contemplar») Cuándo nos referimos al uso se puede definir como espacio destinado a actividades teatrales en todas sus variantes u otro tipo de espectáculos.

Se puede diferenciar de un auditorio en el diseño del espacio destinado al público, su uso y que tanto la infraestructura técnica y acústica es adecuada para este tipo de espectáculos teatrales.

Los espacios en el interior del teatro son dos: espacios teatrales y espacios destinados al público.

Dentro del espacio teatral diferenciamos:

- **Espacio escénico**

Es la parte destinada a la representación, también llamada escenario. Habitualmente en la mayoría de los teatros occidentales la disposición se denomina teatro a la italiana. Y el escenario se sitúa enfrente a los espectadores en un plano elevado.

Este espacio puede adoptar varias formas, circular, rectangular, cuadrado, en corbata todas ellas estudiadas para aumentar el grado de visión de los espectadores.

Tienen por lo general un foso en el que se puede situar la orquesta en un nivel inferior al escenario.

- **Sala de ensayo**

- **Camerinos**

- **Oficinas de gestión**

Dentro del espacio destinado al público diferenciamos:

- **Sala**

La parte más baja es la Platea, en los teatros contemporáneos el patio de butacas suele estar constituido por un anfiteatro que permite una buena visibilidad desde las filas más alejadas.

Los espacios en plantas superiores se denominan palcos y la parte más alta con butacas se llama gallinero.

- **Foyer**

Espacio próximo al teatro habitualmente destinado al descanso.

- **AUDITORIO**

(Del latín, *auditorium* o «lugar para escuchar») Según su uso podemos definir como espacio destinado principalmente a conciertos, recitales, conferencias, coloquios, lecturas públicas, etc.

Podemos diferenciar varias zonas dentro de un auditorio: zona exterior, zona administrativa, zona de butacas (butacas, pórtico y galería, sala y gradería, control de iluminación y sonido, caseta de proyección...), zona de camerinos y zona de servicios generales.

Diferenciamos basándonos en esta clasificación nuestros recintos y analizamos los parámetros geométricos para ver si hay diferencias notables entre estos dos tipos de arquitectura.

	CÓDIGO	TEATROS	V/N	V/S _A	S _A /N
Nº2	003	Gran Teatre del Liceu - Barcelona	5,60	9,35	0,60
Nº10	039	Gran Teatro Falla - Cádiz	8,63	17,41	0,50
Nº11	040	Teatro Romea - Murcia	5,87	9,10	0,65
Nº12	043	Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera	7,71	17,92	0,43
Nº14	056	Teatro Gayarre - Pamplona	5,43	9,29	0,58
Nº15	057	Teatro Miguel de Cervantes - Málaga	8,13	9,61	0,85

Tabla 4 Teatros estudiados y parámetros geométricos

	CÓDIGO	AUDITORIOS	V/N	V/S _A	S _A /N
Nº1	002	Sala Sinfónica - Auditorio Nacional de Música - Madrid	12,37	16,18	0,76
Nº3	005	Auditorio - Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música - Bilbao	13,52	17,95	0,75
Nº4	007	Sala Principal - Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe - Oviedo	7,43	13,43	0,55
Nº5	009	Sala Mozart - Auditorio-Palacio de Congresos - Zaragoza	11,67	14,59	0,80
Nº6	012	Auditorio - Centro Kursaal - San Sebastián/Donostia	8,18	18,18	0,45
Nº7	017	Sala Sinfónica - Auditorio Alfredo Kraus - Las Palmas de Gran Canaria	11,36	17,91	0,63
Nº8	021	Sala Principal - Baluarte. Palacio de Congresos y Audit. de Navarra - Pamplona	10,71	17,48	0,61
Nº9	033	Auditorio Manuel de Falla - Granada	9,06	15,76	0,57
Nº13	045	Sala Principal, Auditorio Ciudad de León - León	10,63	16,14	0,66
Nº16	069	Sala Buero Vallejo - Guadalajara	12,08	22,12	0,55

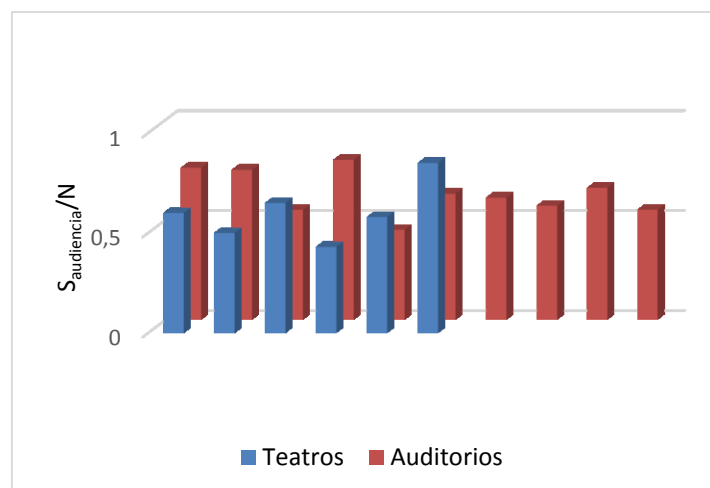
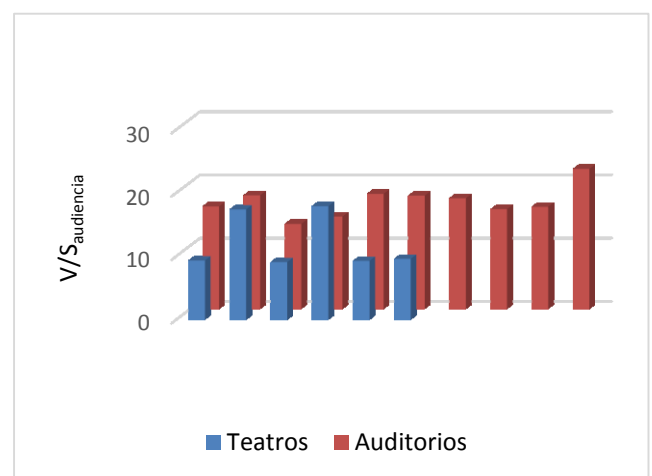
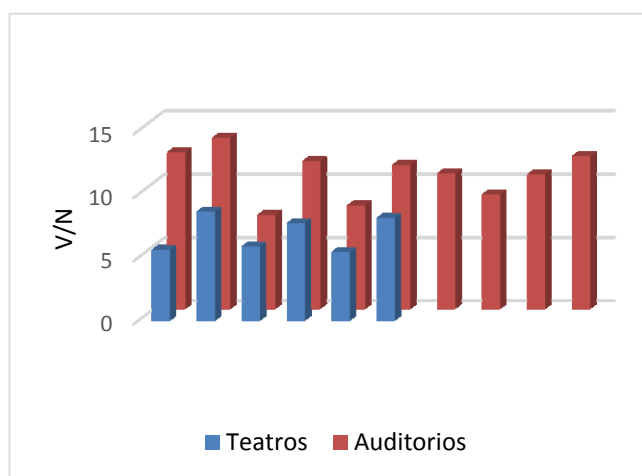
Tabla 5 Teatros estudiados y parámetros geométricos

Fijándonos en la relación entre los diferentes parámetros geométricos estudiados (V/N: Relación entre el volumen de la sala y superficie de la audiencia y V/S_A:

Relación entre el volumen de la sala y la superficie de la audiencia) recopilados en las siguientes gráficas, se distingue que estas relaciones, exceptuando algún caso, son significativamente más grandes en auditorios que en teatros.

Esto se debe principalmente en que el espacio destinado al público es mayor en teatros que en auditorios, por ello la relación V/N y V/S_A es más pequeña en teatros.

Si nos fijamos ahora en el último parámetro estudiado (S_A/N : Relación entre la superficie de la audiencia y el número de plazas), presentan menos diferencias significativas, siendo los valores bastante similares, principalmente porque las dimensiones de las butacas destinadas a estos recintos suelen seguir estándares.



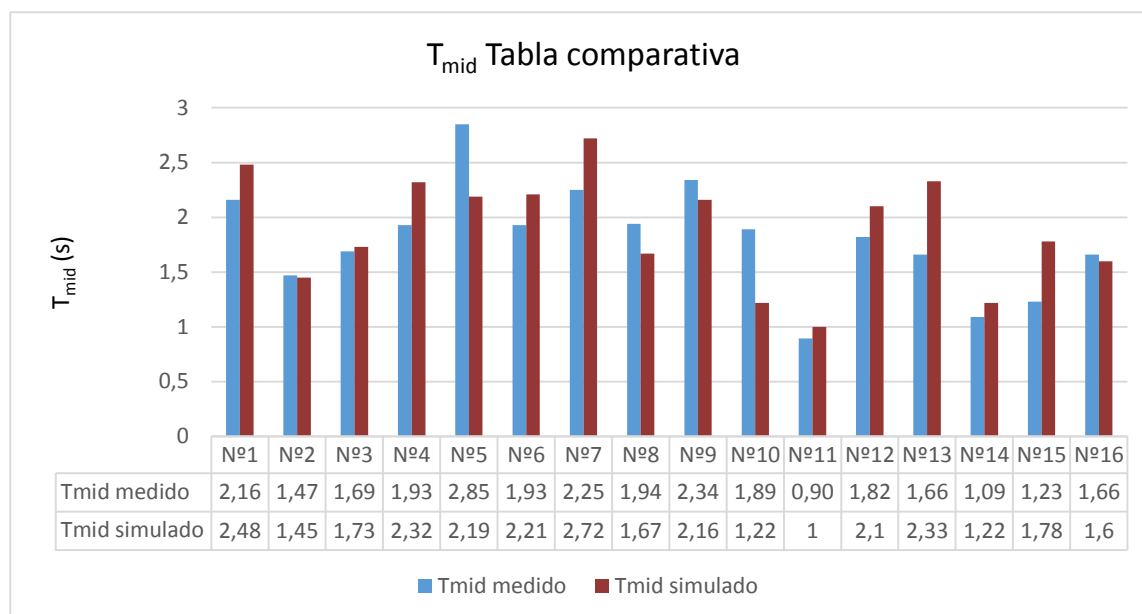
7. ANÁLISIS ACÚSTICO COMPARATIVO Y EXPOSICIÓN DE DATOS

7.1 TABLAS GLOBALES COMPARATIVAS PARÁMETROS ACÚSTICOS

A continuación presentamos los resultados para los diferentes parámetros obtenidos en el programa de simulación y en las medidas experimentales.

7.1.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN T_{MID}

	CÓDIGO	NOMBRE SALAS	T_{MID} (s) MEDIDO	T_{MID} (s) SIMULADO
Nº1	002	Sala Sinfónica - Auditorio Nacional de Música - Madrid	2,16	2,48
Nº2	003	Gran Teatre del Liceu - Barcelona	1,47	1,45
Nº3	005	Auditorio - Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música - Bilbao	1,69	1,73
Nº4	007	Sala Principal - Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe - Oviedo	1,93	2,32
Nº5	009	Sala Mozart - Auditorio-Palacio de Congresos - Zaragoza	2,85	2,19
Nº6	012	Auditorio - Centro Kursaal - San Sebastián/Donostia	1,93	2,21
Nº7	017	Sala Sinfónica - Auditorio Alfredo Kraus - Las Palmas de Gran Canaria	2,25	2,72
Nº8	021	Sala Principal - Baluarte. Palacio de Congresos y Audit. de Navarra - Pamplona	1,94	1,67
Nº9	033	Auditorio Manuel de Falla - Granada	2,34	2,16
Nº10	039	Gran Teatro Falla - Cádiz	1,89	1,22
Nº11	040	Teatro Romea - Murcia	0,90	1
Nº12	043	Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera	1,82	2,1
Nº13	045	Sala Principal, Auditorio Ciudad de León - León	1,66	2,33
Nº14	056	Teatro Gayarre - Pamplona	1,09	1,22
Nº15	057	Teatro Miguel de Cervantes - Málaga	1,23	1,78
Nº16	069	Sala Buero Vallejo - Guadalajara	1,66	1,6



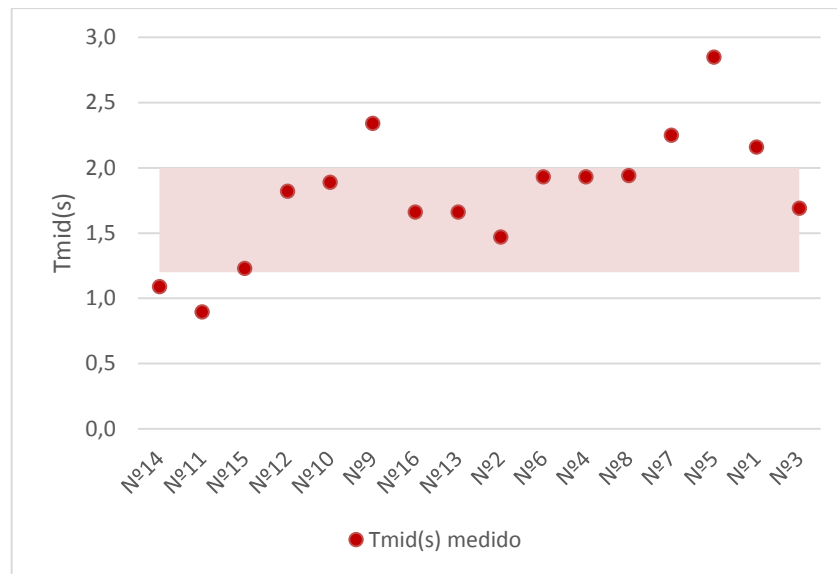
Podemos comentar que la mayoría de los valores medidos son apropiados para salas destinadas a conciertos ya sea para música de cámara o música sinfónica y salas destinadas al uso teatral. Estando los valores dentro de los márgenes de valores recomendados para ese uso [1,2 – 2]s. Por lo tanto, la sensación acústica es buena. Destacamos los valores obtenidos en seis recintos.

El teatro Romea en Murcia (N°11), es un recinto bastante apagado, con valores más propios para uso como cine o sala de conferencias que como teatro.

Por otro lado, en el auditorio Nacional de Música de Madrid (N°1), la Sala Mozart en el auditorio palacio de congresos de Zaragoza (N°5), el auditorio Alfredo Kraus en Las Palmas de Gran Canaria (N°7) y el auditorio Manuel de Falla en Granada (N°9), los valores del T_{mid} medidos son los más altos del conjunto, propios de iglesias o catedrales.

El Gran Teatre del Liceu en Barcelona (N°2) tiene un valor $T_{mid} = 1,47$ s, valor recomendado para Teatros de Ópera, por consiguiente, confirmamos su prestigio como una de las salas de ópera más importantes del mundo.

La siguiente gráfica representa el tiempo de reverberación en segundos de todos los recintos ordenados de menor a mayor volumen en el eje x. La zona coloreada corresponde a tiempos de reverberación recomendados que están dentro del rango [1,2 – 2] s. A partir de 2 s estarían por encima del límite superior cuyos valores son propios recomendados para Iglesias y catedrales.

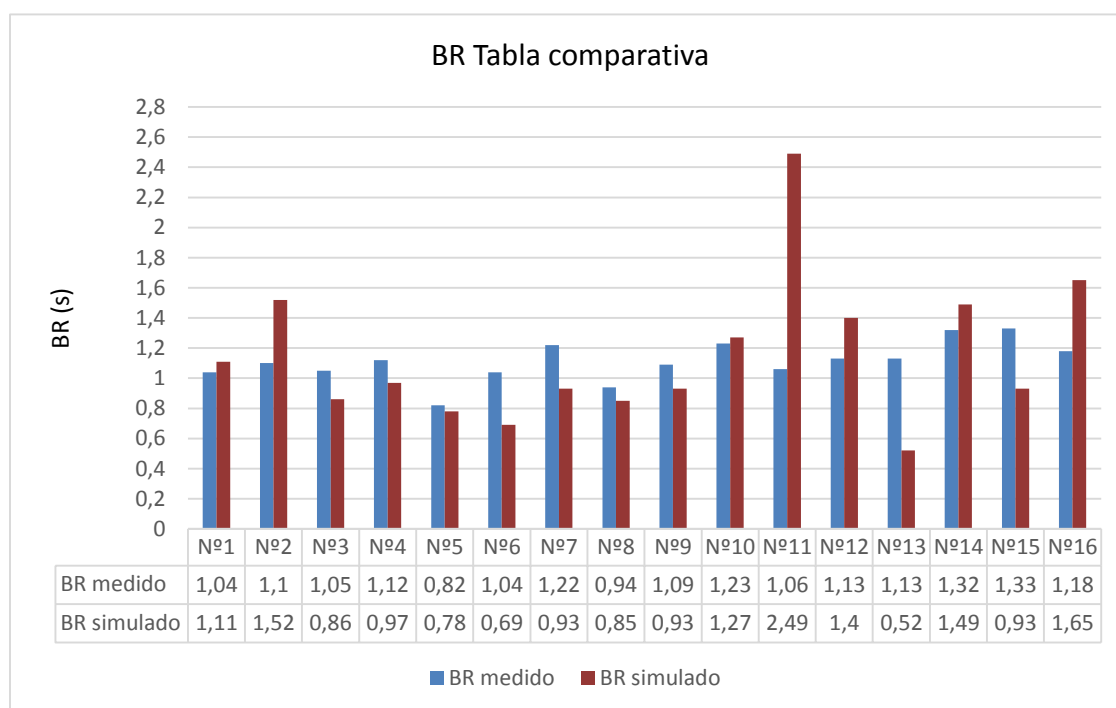


Con excepción de la Sala Mozart (Nº5) y el Auditorio Manuel de Falla (Nº9) en los que sus valores del tiempo de reverberación son bastante elevados, propios de salas de un volumen mayor, el resto coincide que sus tiempos de reverberación son más grandes debido, en parte, al mayor volumen.²

² Las dos magnitudes de las que depende el tiempo de reverberación son el volumen y la absorción de recinto, como se ha explicado en el apartado 3.6.1.1 Tiempo de Reverberación.

7.1.2 CALIDEZ (BR)

	CÓDIGO	NOMBRE SALAS	BR (s) MEDIDO	BR (s) SIMULADO
Nº1	002	Sala Sinfónica - Auditorio Nacional de Música - Madrid	1,04	1,11
Nº2	003	Gran Teatre del Liceu - Barcelona	1,1	1,52
Nº3	005	Auditorio - Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música - Bilbao	1,05	0,86
Nº4	007	Sala Principal - Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe - Oviedo	1,12	0,97
Nº5	009	Sala Mozart - Auditorio-Palacio de Congresos - Zaragoza	0,82	0,78
Nº6	012	Auditorio - Centro Kursaal - San Sebastián/Donostia	1,04	0,69
Nº7	017	Sala Sinfónica - Auditorio Alfredo Kraus - Las Palmas de Gran Canaria	1,22	0,93
Nº8	021	Sala Principal - Baluarte. Palacio de Congresos y Audit. de Navarra - Pamplona	0,94	0,85
Nº9	033	Auditorio Manuel de Falla - Granada	1,09	0,93
Nº10	039	Gran Teatro Falla - Cádiz	1,23	1,27
Nº11	040	Teatro Romea - Murcia	1,06	2,49
Nº12	043	Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera	1,13	1,4
Nº13	045	Sala Principal, Auditorio Ciudad de León - León	1,13	0,52
Nº14	056	Teatro Goyarre - Pamplona	1,32	1,49
Nº15	057	Teatro Miguel de Cervantes - Málaga	1,33	0,93
Nº16	069	Sala Buero Vallejo - Guadalajara	1,18	1,65



Según los valores recomendados por L. Beranek para salas ocupadas están dentro del rango $[1,1 - 1,25]$ s si su $T_{mid}=2,2$ s y dentro del rango $[1,1 - 1,45]$ s si su $T_{mid}=1,8$ s.

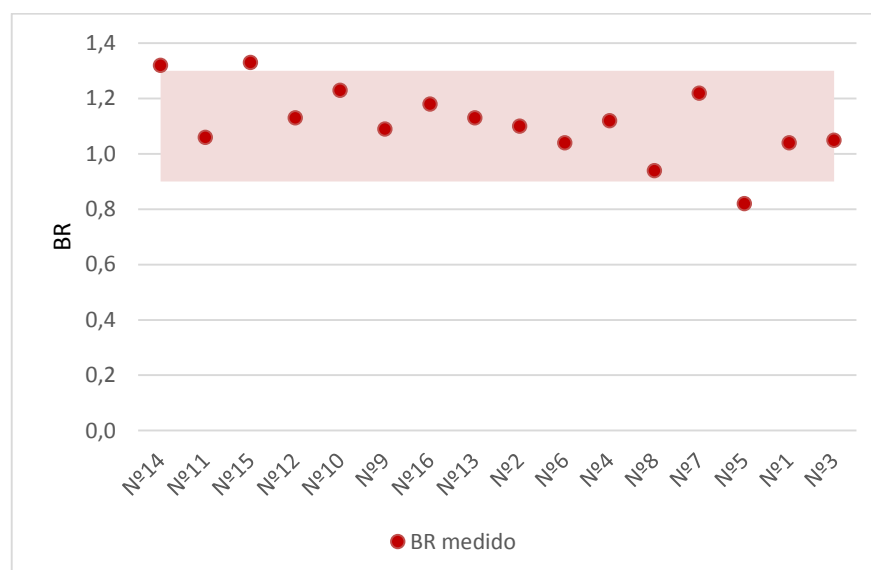
Nos basamos en los valores correspondientes a las mediciones en “sala ocupada” para su posterior comparación con los valores recomendados por Beranek.

Los recintos con esas condiciones de medida son:

- Gran Teatre del Liceu, Barcelona (Nº2)
- Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música, Bilbao (Nº3)
- Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe, Oviedo (Nº4)
- Teatro Romea, Murcia (Nº11)
- Auditorio Ciudad de León, León (Nº13)

Ninguno de los recintos anteriormente nombrados tiene los valores $T_{mid}=2,2$ s y $T_{mid}=1,8$ s por lo que nos basamos en otro criterio de comparación.

La siguiente gráfica representa la Calidez de todos los recintos ordenados de menor a mayor volumen en el eje x. La zona coloreada corresponde a los valores óptimos para la calidez según Higini Arau [3], que recomienda valores dentro del rango $[0,9 - 1,3]$ s correspondientes a valores aceptables para uso teatral. Siendo lo más aceptable tender al valor 1,1 e indicando que la calidez valga 1,2 como valor óptimo.



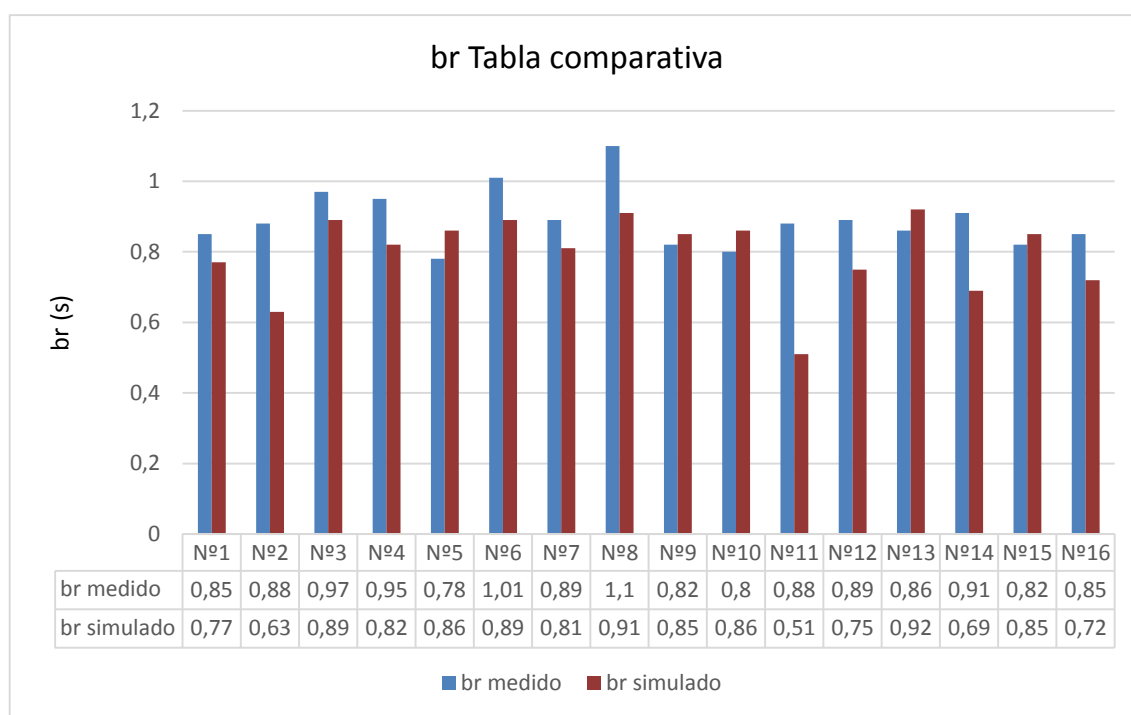
El teatro Gayarre en Pamplona (Nº14) cuya Calidez $BR=1,32$ y el teatro Miguel de Cervantes en Málaga (Nº15) cuya Calidez $BR=1,3$ superan el límite, aunque el valor es ligeramente superior, por lo que consideramos una calidez acústica correcta.

Por otro lado, la Sala Mozart en Zaragoza (Nº5) cuya Calidez $BR=0,82$ es ligeramente inferior, también con una calidez aceptable.

Los valores de esta magnitud tienen que ser altos para ser considerados buenos intentando que en ningún caso sean inferiores a 0,8 s.

7.1.3 BRILLO (Br)

	CÓDIGO	NOMBRE SALA	br (s) MEDIDO	br (s) SIMULADO
Nº1	002	Sala Sinfónica - Auditorio Nacional de Música - Madrid	0,85	0,77
Nº2	003	Gran Teatre del Liceu - Barcelona	0,88	0,63
Nº3	005	Auditorio - Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música - Bilbao	0,97	0,89
Nº4	007	Sala Principal - Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe - Oviedo	0,95	0,82
Nº5	009	Sala Mozart - Auditorio-Palacio de Congresos - Zaragoza	0,78	0,86
Nº6	012	Auditorio - Centro Kursaal - San Sebastián/Donostia	1,01	0,89
Nº7	017	Sala Sinfónica - Auditorio Alfredo Kraus - Las Palmas de Gran Canaria	0,89	0,81
Nº8	021	Sala Principal - Baluarte. Palacio de Congresos y Audit. de Navarra - Pamplona	1,1	0,91
Nº9	033	Auditorio Manuel de Falla - Granada	0,82	0,85
Nº10	039	Gran Teatro Falla - Cádiz	0,8	0,86
Nº11	040	Teatro Romea - Murcia	0,88	0,51
Nº12	043	Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera	0,89	0,75
Nº13	045	Sala Principal, Auditorio Ciudad de León - León	0,86	0,92
Nº14	056	Teatro Gayarre - Pamplona	0,91	0,69
Nº15	057	Teatro Miguel de Cervantes - Málaga	0,82	0,85
Nº16	069	Sala Buero Vallejo - Guadalajara	0,85	0,72



La siguiente gráfica representa el parámetro Brillo de todos los recintos ordenados de menor a mayor volumen en el eje x.

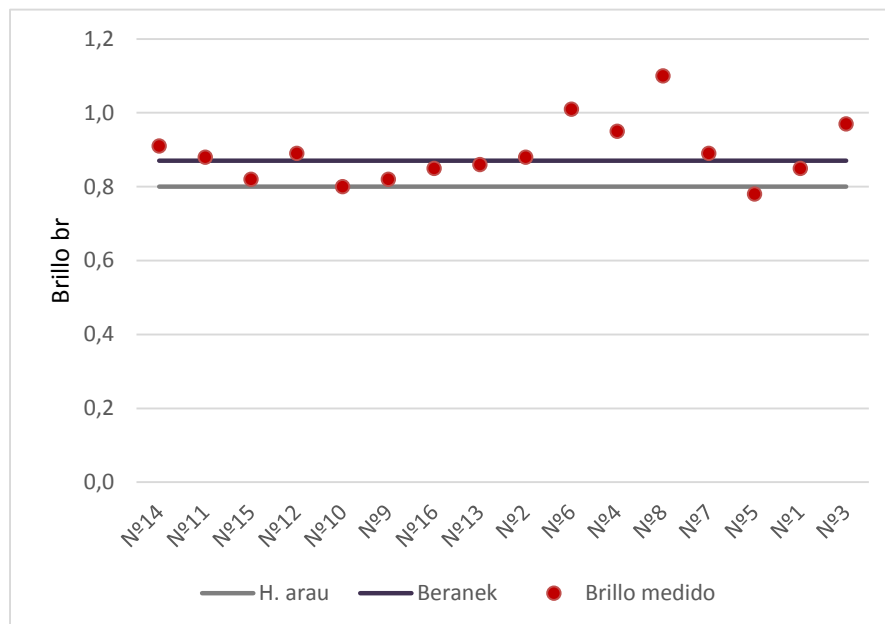
Nos basamos en los valores correspondientes a las mediciones en “sala ocupada” para su posterior comparación con los valores recomendados por Beranek.

Los recintos con esas condiciones de medida son:

- Gran Teatre del Liceu, Barcelona (Nº2)
- Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música, Bilbao (Nº3)
- Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe, Oviedo (Nº4)
- Teatro Romea, Murcia (Nº11)
- Auditorio Ciudad de León, León (Nº13)

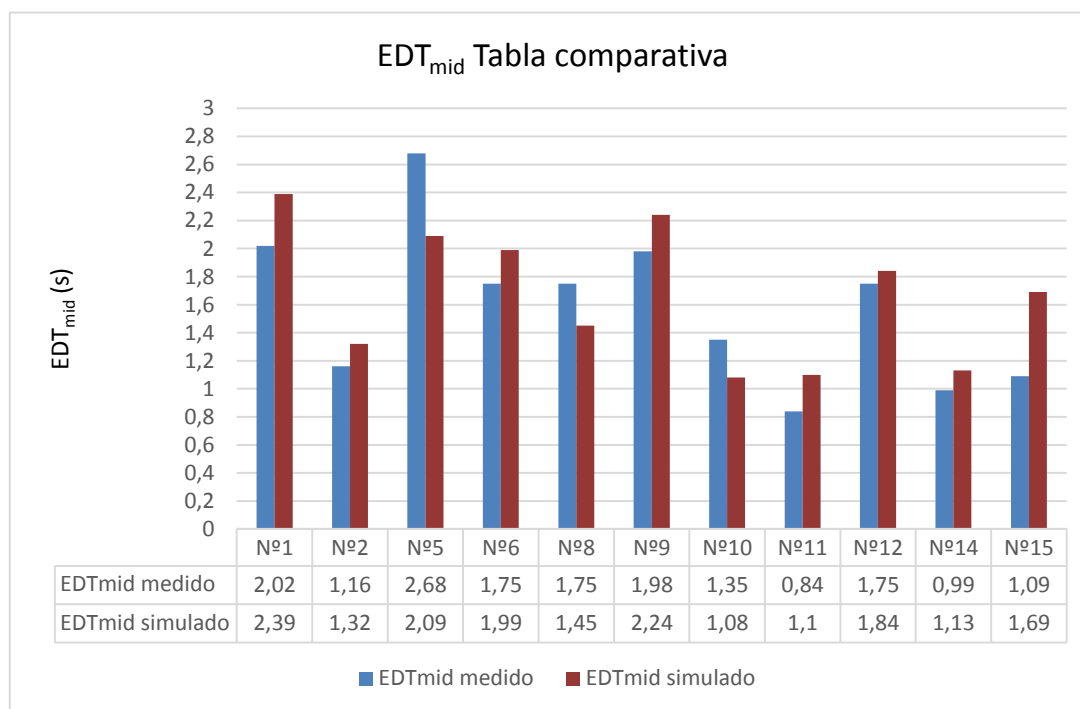
De los recintos con condiciones de medición de sala ocupada anteriormente nombrados, todos ellos se encuentran por encima del valor mínimo recomendado por Beranek ($br > 0,87$) exceptuando el auditorio Ciudad de León (Nº13) con $br=0,86$, muy ligeramente inferior, por lo que el sonido de las salas resulta brillante.

Basándonos en el criterio de H. Arau, todos los valores presentados para el brillo se encuentran por encima del valor mínimo recomendado ($br > 0,8$), exceptuando la sala Mozart en Zaragoza (Nº5) con un valor $br = 0,78$ que como es ligeramente inferior, consideramos también como aceptable.



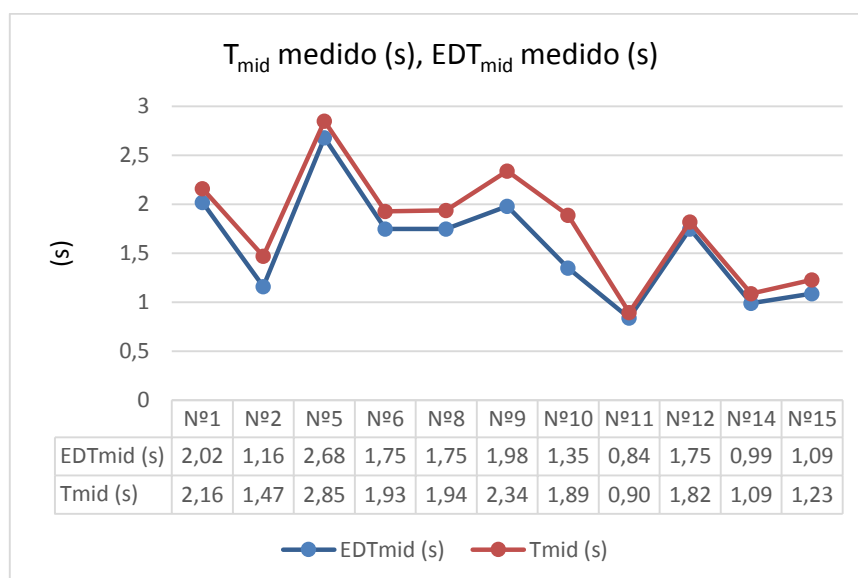
7.1.4 TIEMPO DE CAÍDA INICIAL (EDT)

	CÓDIGO	NOMBRE SALA	EDT (s) MEDIDO	EDT (s) SIMULADO
Nº1	002	Sala Sinfónica - Auditorio Nacional de Música - Madrid	2,02	2,39
Nº2	003	Gran Teatre del Liceu - Barcelona	1,16	1,32
Nº3	005	Auditorio - Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música - Bilbao	-	-
Nº4	007	Sala Principal - Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe - Oviedo	-	-
Nº5	009	Sala Mozart - Auditorio-Palacio de Congresos - Zaragoza	2,68	2,09
Nº6	012	Auditorio - Centro Kursaal - San Sebastián/Donostia	1,75	1,99
Nº7	017	Sala Sinfónica - Auditorio Alfredo Kraus - Las Palmas de Gran Canaria	-	-
Nº8	021	Sala Principal - Baluarte. Palacio de Congresos y Audit. de Navarra - Pamplona	1,75	1,45
Nº9	033	Auditorio Manuel de Falla - Granada	1,98	2,24
Nº10	039	Gran Teatro Falla - Cádiz	1,35	1,08
Nº11	040	Teatro Romea - Murcia	0,84	1,1
Nº12	043	Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera	1,75	1,84
Nº13	045	Sala Principal, Auditorio Ciudad de León - León	-	-
Nº14	056	Teatro Gayarre - Pamplona	0,99	1,13
Nº15	057	Teatro Miguel de Cervantes - Málaga	1,09	1,69
Nº16	069	Sala Buero Vallejo - Guadalajara	-	-



La siguiente gráfica representa los valores del T_{mid} medido y los valores del EDT_{mid} medido en segundos de los recintos estudiados.

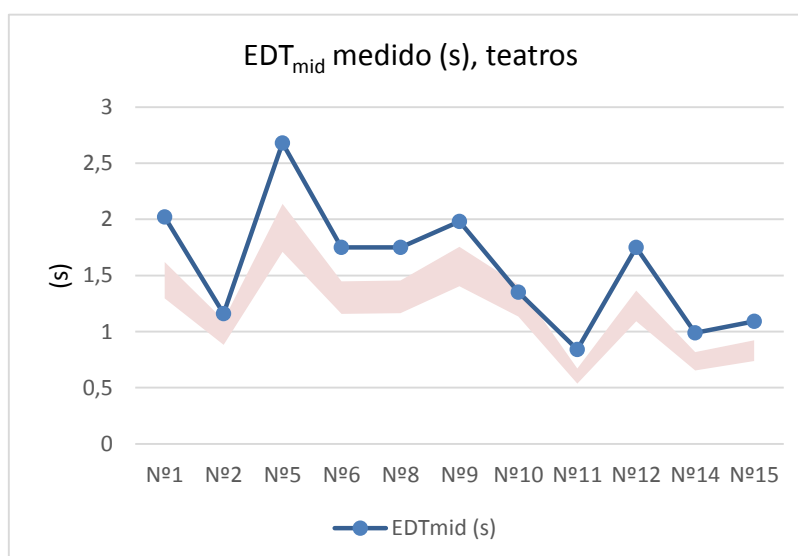
Según Beranek el valor T_{mid} tiene que ser del orden del EDT_{mid} ($T_{mid} \approx EDT_{mid}$).

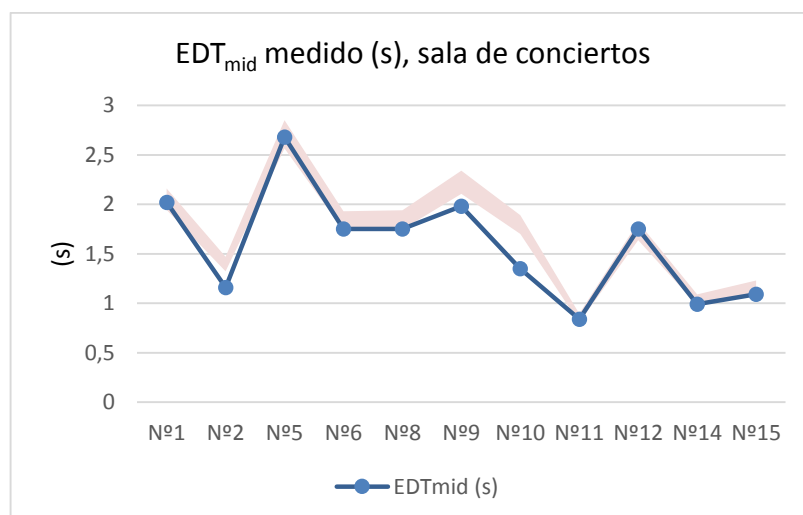
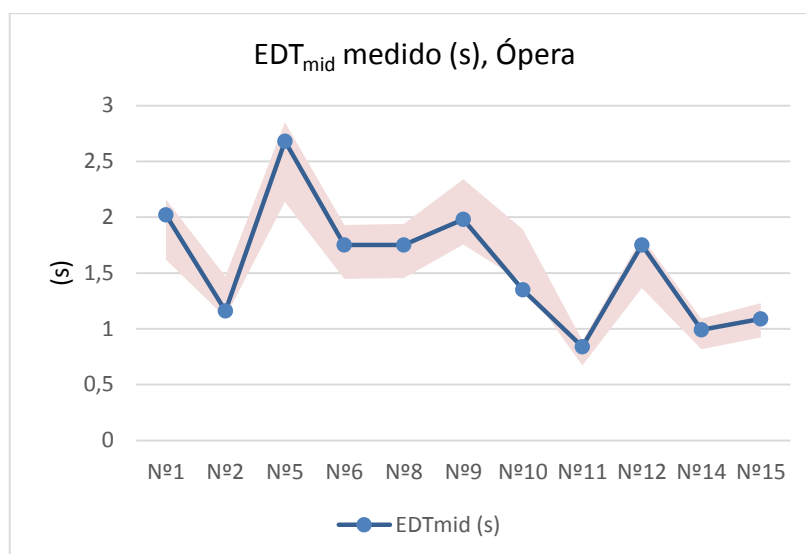


En el auditorio Nacional de Música de Madrid (Nº1), en la sala Mozart de Zaragoza (Nº5), en el teatro Romea de Murcia (Nº11), en el teatro Villamarta en Jerez de la Frontera (Nº12), en el teatro Gayarre en Pamplona (Nº14) y en el teatro Miguel de Cervantes en Málaga (Nº15), dichos valores de EDT_{mid} son del mismo orden que los diferentes valores de T_{mid} indicados en la tabla adjunta a la gráfica. Por lo tanto, el grado de difusión del sonido en las salas es correcto.

En el resto de recintos el EDT_{mid} son ligeramente más bajos que el T_{mid} . La sensación de dichas salas será ligeramente más “apagadas” de lo que se ha deducido con el T_{mid} .

Las siguientes gráficas representan los valores de EDT_{mid} medido en las salas estudiadas y las zonas coloreadas representan los valores recomendados por H.Arau [3] para teatros, recintos destinados a música de ópera y salas de conciertos respectivamente.





Basándonos en éste último criterio señalamos que todos los valores del EDT_{mid} recomendados para teatros están fuera del rango de valores recomendados por H. Arau, excepto el Gran teatro de Falla (Nº10).

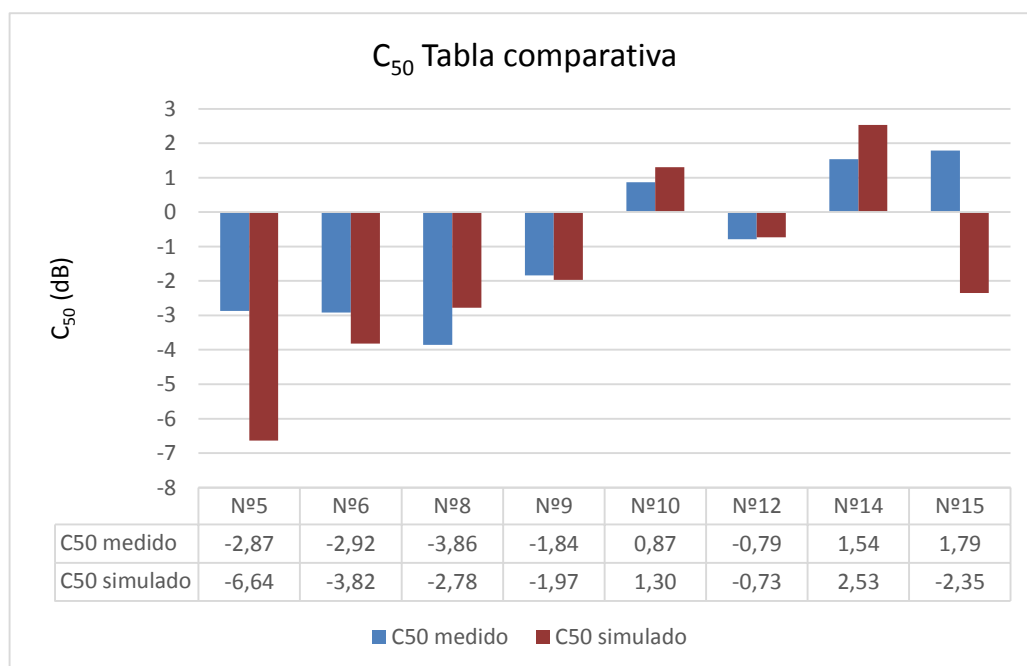
En los valores del EDT_{mid} recomendados para ópera excepto en el caso del Gran Teatro Falla (Nº10), están dentro de las zonas coloreadas, por lo que están dentro de los valores recomendados y podemos decir que hay una buena difusión del sonido.

En los valores del EDT_{mid} recomendados para salas de conciertos no se encuentran dentro de los valores recomendados el Gran teatro del Liceu (Nº2), Auditorio Manuel de Falla (Nº9), Gran Teatro de Falla (Nº10) y el Teatro Miguel de Cervantes (Nº15).

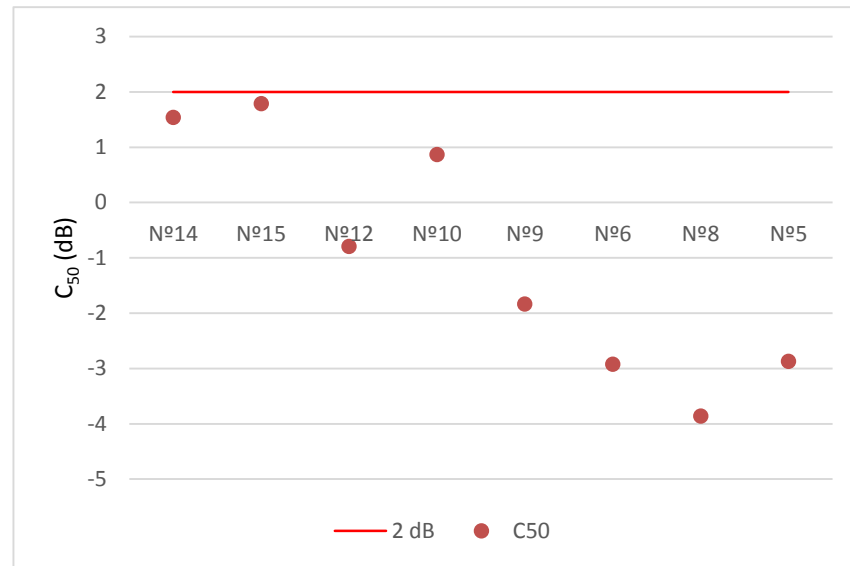
Concluimos que todos los recintos estarían bien acondicionados para música de ópera excepto el Gran teatro de Falla (Nº10) cuya acústica se acerca más a un uso recomendado para actividades teatrales. Otros están bien acondicionados tanto como para uso de música de ópera como para sala de conciertos, es el caso del Auditorio Nacional de música (Nº1), Sala Mozart (Nº5), Baluarte (Nº8), Teatro Romea (Nº11), Teatro Villamarta (Nº12) y Teatro Gayarre (Nº14).

7.1.5 CLARIDAD PARA LA PALABRA (C₅₀)

	CÓDIGO	NOMBRE SALA	C ₅₀ (dB) MEDIDO	C ₅₀ (dB) SIMULADO
Nº1	002	Sala Sinfónica - Auditorio Nacional de Música - Madrid	-	-
Nº2	003	Gran Teatre del Liceu - Barcelona	-	-
Nº3	005	Auditorio - Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música - Bilbao	-	-
Nº4	007	Sala Principal - Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe - Oviedo	-	-
Nº5	009	Sala Mozart - Auditorio-Palacio de Congresos - Zaragoza	-2,87	-6,64
Nº6	012	Auditorio - Centro Kursaal - San Sebastián/Donostia	-2,92	-3,82
Nº7	017	Sala Sinfónica - Auditorio Alfredo Kraus - Las Palmas de Gran Canaria	-	-
Nº8	021	Sala Principal - Baluarte. Palacio de Congresos y Audit. de Navarra - Pamplona	-3,86	-2,78
Nº9	033	Auditorio Manuel de Falla - Granada	-1,84	-1,97
Nº10	039	Gran Teatro Falla - Cádiz	0,87	1,30
Nº11	040	Teatro Romea - Murcia	-	-
Nº12	043	Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera	-0,79	-0,73
Nº13	045	Sala Principal, Auditorio Ciudad de León - León	-	-
Nº14	056	Teatro Gayarre - Pamplona	1,54	2,53
Nº15	057	Teatro Miguel de Cervantes - Málaga	1,79	-2,35
Nº16	069	Sala Buero Vallejo - Guadalajara	-	-

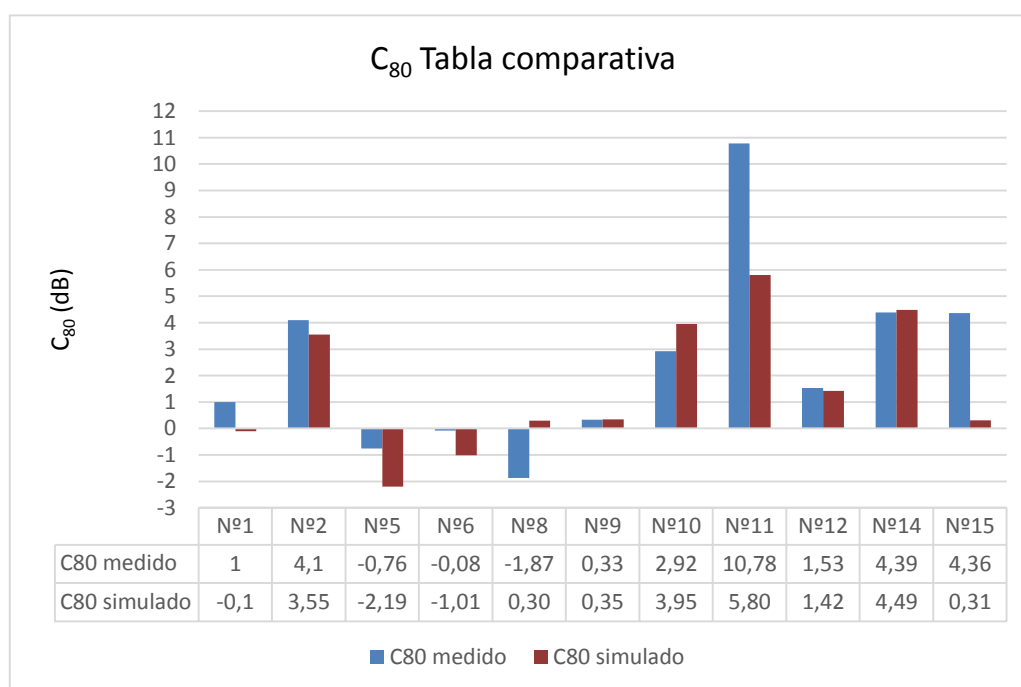


La siguiente gráfica representa el parámetro C_{50} (dB) o Claridad para la palabra de todos los recintos ordenados de menor a mayor volumen en el eje x. Se muestran los valores medios medidos de éste último parámetro (“speech average”), todos ellos con condiciones de medición de sala vacía. Estos valores se hayan por debajo del valor mínimo recomendado (2 dB) lo cual es indicativo de que la inteligibilidad de la palabra y sonoridad no son muy buenas. Las salas de menor volumen son las que presentan unos valores de C_{50} más altos, hay menos inteligibilidad de la palabra.



7.1.6 CLARIDAD MUSICAL (C_{80})

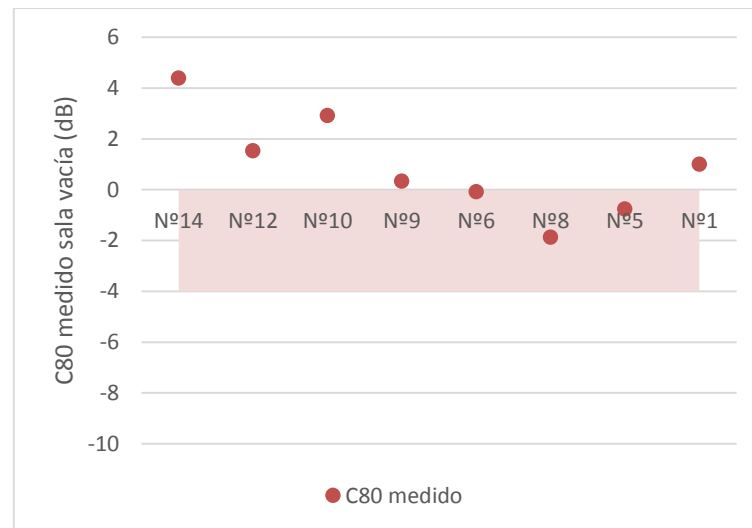
	CÓDIGO	NOMBRE SALA	C_{80} (dB) MEDIDO	C_{80} (dB) SIMULADO
Nº1	002	Sala Sinfónica - Auditorio Nacional de Música - Madrid	1	-0,1
Nº2	003	Gran Teatre del Liceu - Barcelona	4,1	3,55
Nº3	005	Auditorio - Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música - Bilbao	-	-
Nº4	007	Sala Principal - Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe - Oviedo	-	-
Nº5	009	Sala Mozart - Auditorio-Palacio de Congresos - Zaragoza	-0,76	-2,19
Nº6	012	Auditorio - Centro Kursaal - San Sebastián/Donostia	-0,08	-1,01
Nº7	017	Sala Sinfónica - Auditorio Alfredo Kraus - Las Palmas de Gran Canaria	-	-
Nº8	021	Sala Principal - Baluarte. Palacio de Congresos y Audit. de Navarra - Pamplona	-1,87	0,30
Nº9	033	Auditorio Manuel de Falla - Granada	0,33	0,35
Nº10	039	Gran Teatro Falla - Cádiz	2,92	3,95
Nº11	040	Teatro Romea - Murcia	10,78	5,80
Nº12	043	Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera	1,53	1,42
Nº13	045	Sala Principal, Auditorio Ciudad de León - León	-	-
Nº14	056	Teatro Gayarre - Pamplona	4,39	4,49
Nº15	057	Teatro Miguel de Cervantes - Málaga	4,36	0,31
Nº16	069	Sala Buero Vallejo - Guadalajara	-	-



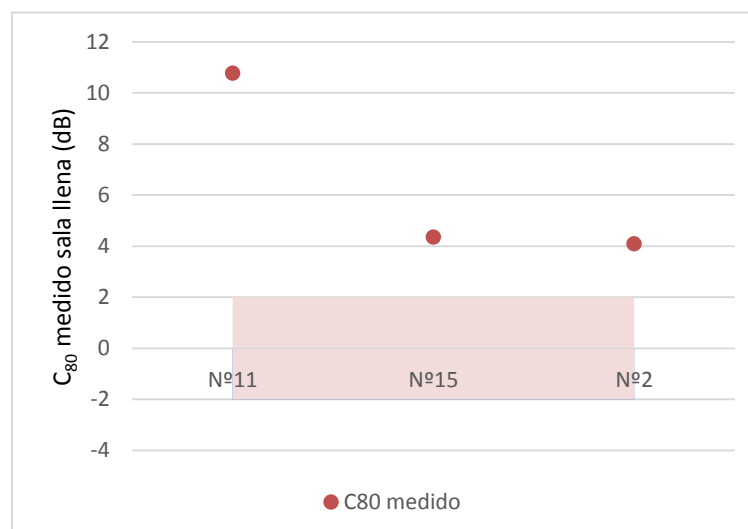
Éste parámetro se correlaciona bien con la percepción subjetiva de la música y es análogo al parámetro C_{50} pero con el intervalo de percepción de energía inicial ampliado a los 80 ms.

Para el parámetro C_{80} se recomienda que el valor para sala vacía esté comprendido entre -4 dB y 0 dB. Según L.G. Marshall y Barron, los valores recomendados para sala ocupada están entre -2 dB y $+2$ dB.

En la siguiente gráfica se dan los valores de la claridad musical para salas vacías de todos los recintos ordenados de menor a mayor volumen en el eje x. Como puede observarse, sólo tres recintos se sitúan en el rango recomendado.



En la siguiente gráfica se dan los valores de la claridad musical para salas ocupadas. Como puede observarse, ninguno de los recintos está dentro del rango para valores recomendados.

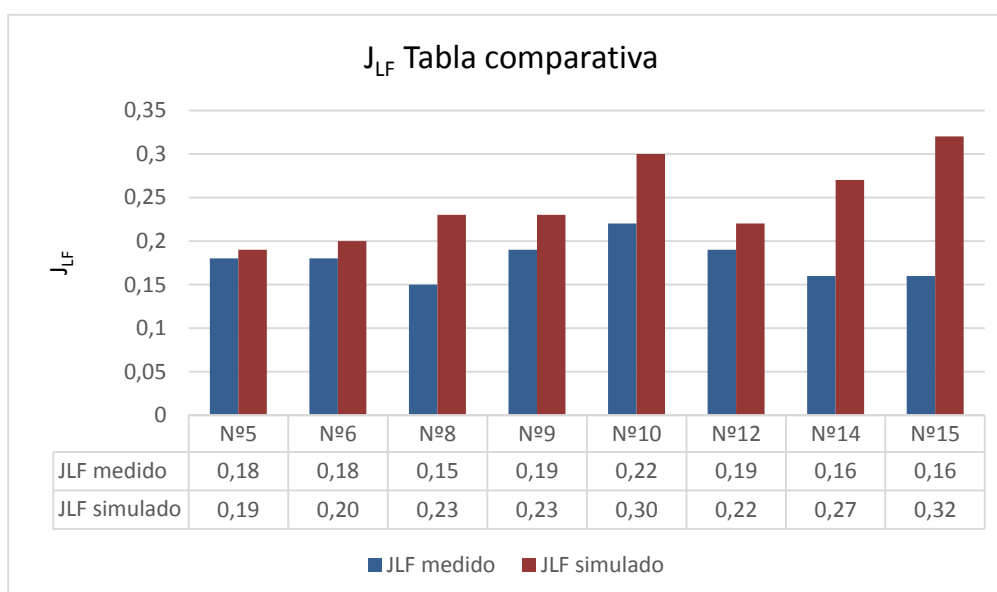


Basándonos en los valores recomendados por H.Arau [3] (Salas de concierto -2 dB $< C_{80} < 4$ dB, salas de ópera -2 dB $< C_{80} < 4$ dB, salas de teatro $C_{80} > 6$ dB) observamos que los recintos medidos con condiciones de sala vacía de la primera gráfica cumplen

los valores recomendados para salas de conciertos y de música de ópera exceptuando el Teatro Gayarre en Pamplona (Nº14) que supera los 4 dB mínimamente. Los recintos medidos con condiciones de sala llena de la gráfica segunda, el teatro Romea en Murcia (Nº11), su C_{80} tiene un valor propio de salas de teatro y los otros dos recintos tienen el C_{80} ligeramente superior de valores recomendados para salas de conciertos y de música de ópera.

7.1.7 EFICIENCIA LATERAL (J_{LF})

	CÓDIGO	NOMBRE SALA	J_{LF} MEDIDO	J_{LF} SIMULADO
Nº1	002	Sala Sinfónica - Auditorio Nacional de Música - Madrid	-	-
Nº2	003	Gran Teatre del Liceu - Barcelona	-	-
Nº3	005	Auditorio - Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música - Bilbao	-	-
Nº4	007	Sala Principal - Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe - Oviedo	-	-
Nº5	009	Sala Mozart - Auditorio-Palacio de Congresos - Zaragoza	0,18	0,19
Nº6	012	Auditorio - Centro Kursaal - San Sebastián/Donostia	0,18	0,20
Nº7	017	Sala Sinfónica - Auditorio Alfredo Kraus - Las Palmas de Gran Canaria	-	-
Nº8	021	Sala Principal - Baluarte. Palacio de Congresos y Audit. de Navarra - Pamplona	0,15	0,23
Nº9	033	Auditorio Manuel de Falla - Granada	0,19	0,23
Nº10	039	Gran Teatro Falla - Cádiz	0,22	0,30
Nº11	040	Teatro Romea - Murcia	-	-
Nº12	043	Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera	0,19	0,22
Nº13	045	Sala Principal, Auditorio Ciudad de León - León	-	-
Nº14	056	Teatro Gayarre - Pamplona	0,16	0,27
Nº15	057	Teatro Miguel de Cervantes - Málaga	0,16	0,32
Nº16	069	Sala Buero Vallejo - Guadalajara		

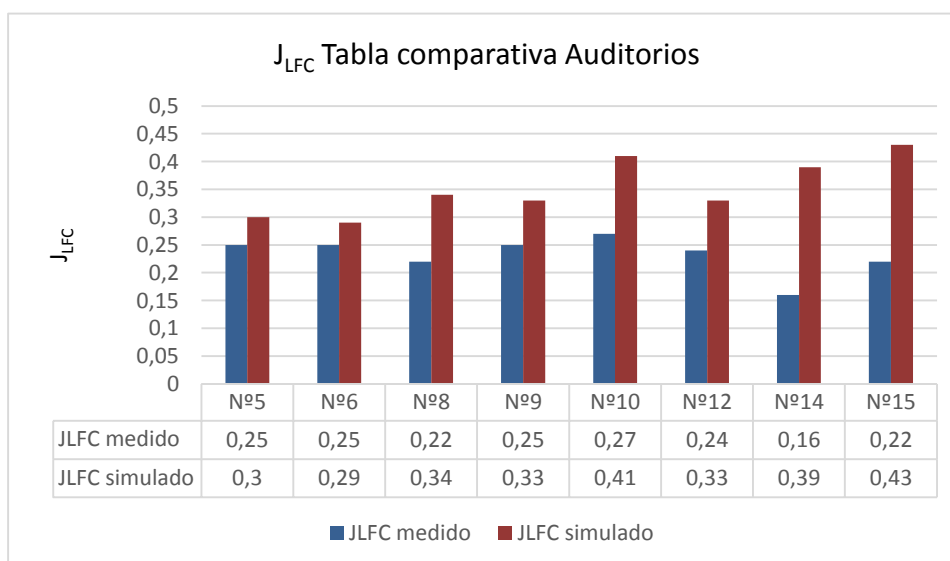


Como valores recomendados para el parámetro eficiencia lateral son $J_{LF E4} \geq 0,19$ para sala vacía. Para los recintos estudiados, todos estos bajo condiciones de sala vacía, en los valores medidos se cumple o los valores son ligeramente inferiores, por lo tanto, el grado de espacialidad del sonido es bueno.

Si comparamos estos valores con los recomendados por Barron ($0,1 \leq J_{LFE4} \leq 0,35$) todos están dentro del rango, por lo que con más exactitud afirmamos que el grado de espacialidad del sonido es bueno.

7.1.8 J_{LFC}

	CÓDIGO	NOMBRE SALA	J_{LFC} MEDIDO	J_{LFC} SIMULADO
Nº1	002	Sala Sinfónica - Auditorio Nacional de Música - Madrid	-	-
Nº2	003	Gran Teatre del Liceu - Barcelona	-	-
Nº3	005	Auditorio - Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música - Bilbao	-	-
Nº4	007	Sala Principal - Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe - Oviedo	-	-
Nº5	009	Sala Mozart - Auditorio-Palacio de Congresos - Zaragoza	0,25	0,3
Nº6	012	Auditorio - Centro Kursaal - San Sebastián/Donostia	0,25	0,29
Nº7	017	Sala Sinfónica - Auditorio Alfredo Kraus - Las Palmas de Gran Canaria	-	-
Nº8	021	Sala Principal - Baluarte. Palacio de Congresos y Audit. de Navarra - Pamplona	0,22	0,34
Nº9	033	Auditorio Manuel de Falla - Granada	0,25	0,33
Nº10	039	Gran Teatro Falla - Cádiz	0,27	0,41
Nº11	040	Teatro Romea - Murcia	-	-
Nº12	043	Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera	0,24	0,33
Nº13	045	Sala Principal, Auditorio Ciudad de León - León	-	-
Nº14	056	Teatro Gayarre - Pamplona	0,16	0,39
Nº15	057	Teatro Miguel de Cervantes - Málaga	0,22	0,43
Nº16	069	Sala Buero Vallejo - Guadalajara	-	-



Utilizamos el J_{LFC} como parámetro subjetivamente más preciso a la eficiencia lateral J_{LF} , comprobamos que en este caso los valores están dentro de los valores recomendados ($J_{LFE4} \geq 0,19$ y según Barron $0,1 \leq J_{LFE4} \leq 0,35$) por lo que el grado de espacialidad del sonido es bueno.

7.1.9 STI Y RASTI

En las siguientes tablas se muestran los índices de inteligibilidad (STI/RASTI) medios medidos y simulados.

	CÓDIGO	NOMBRE AUDITORIO	STI MEDIDO	STI SIMULADO
Nº2	003	Gran Teatre del Liceu - Barcelona	0,59	0,60

	CÓDIGO	NOMBRE SALA	RASTI MEDIDO	RASTI SIMULADO
Nº1	002	Sala Sinfónica - Auditorio Nacional de Música - Madrid	0,5	0,46
Nº2	003	Gran Teatre del Liceu - Barcelona	0,59	0,59
Nº3	005	Auditorio - Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música - Bilbao	0,59	0,55
Nº4	007	Sala Principal - Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe - Oviedo	-	-
Nº5	009	Sala Mozart - Auditorio - Palacio de Congresos - Zaragoza	-	-
Nº6	012	Auditorio - Centro Kursaal - San Sebastián/Donostia	-	-
Nº7	017	Sala Sinfónica - Auditorio Alfredo Kraus - Las Palmas de Gran Canaria	-	-
Nº8	021	Sala Principal - Baluarte. Palacio de Congresos y Audit. de Navarra - Pamplona	-	-
Nº9	033	Auditorio Manuel de Falla - Granada	-	-
Nº10	039	Gran Teatro Falla - Cádiz	-	-
Nº11	040	Teatro Romea - Murcia	0,75	0,64
Nº12	043	Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera	-	-
Nº13	045	Sala Principal, Auditorio Ciudad de León - León	-	-
Nº14	056	Teatro Gayarre - Pamplona	-	-
Nº15	057	Teatro Miguel de Cervantes - Málaga	-	-
Nº16	069	Sala Buero Vallejo - Guadalajara	-	-

El RASTI supera el valor 0,50 en todos los casos, siendo éste el valor a partir del que se considera aceptable la inteligibilidad de la palabra. Estos resultados dan a las salas categorías de “aceptables” e incluso “buena” en algunos casos ($RASTI \geq 0,66$).

Si comparamos este dato con los tiempos de reverberación obtenidos, donde los valores se ajustan a recintos destinados para salas de conciertos (música de cámara) y hasta salas destinadas al órgano y canto coral como es el caso del Auditorio Nacional de música,

llegamos a la conclusión de que las salas podrían ser usadas también para conferencias y congresos.

Podríamos comprobar la relación entre el índice RASTI y la claridad de la voz C_{50} pero los valores que disponemos corresponden a diferentes salas.

7.2 CÁLCULO JUST NOTICEABLE DIFFERENCE (JND) Y CÁLCULO DE ERRORES

7.2.1 CÁLCULO DE ERRORES: ERROR ABSOLUTO, ERROR RELATIVO Y ERROR PORCENTUAL

Las siguientes gráficas nos muestran el error absoluto (Δx) y el error relativo expresado en tanto por ciento ϵ_r (%) de los valores de las medidas experimentales y los obtenidos en las simulaciones para los parámetros T_{30} , EDT y J_{LF} de cada recinto. Está demostrado que no es tan importante los errores experimentales cometidos entre dos medidas si no la diferencia subjetiva perceptible por el oído humano que representa esta diferencia, dada por el JND que estudiaremos a continuación, pero nos podemos hacer una idea general de los errores cometidos en las simulaciones.

Nº1 Auditorio Nacional de Música - Madrid					
	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T_{30}	2,16	2,48	2,76	0,3	14,8
EDT	2,02	2,39	3,36	0,4	18,3
J_{LF}	-	-	-	-	-

Nº2 Gran Teatre del Liceu - Barcelona					
	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T_{30}	1,47	1,45	0,28	0,02	1,4
EDT	1,16	1,32	2,58	0,2	13,8
J_{LF}	-	-	-	-	-

Nº3 Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música - Bilbao					
	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T_{30}	1,69	1,73	0,47	0,04	2,4
EDT	-	-	-	-	-
J_{LF}	-	-	-	-	-

Nº4 Auditorio-Palacio de Congresos Príncipe Felipe - Oviedo					
	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T_{30}	1,93	2,32	3,67	0,4	20,2
EDT	-	-	-	-	-

J_{LF}	-	-	-	-	-
-----------------------	---	---	---	---	---

Nº5 Sala Mozart - Auditorio-Palacio de Congresos - Zaragoza

	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T₃₀	2,85	2,19	5,24	0,7	23,2
EDT	2,68	2,09	4,95	0,6	22,0
J_{LF}	-	-	-	-	-

Nº6 Centro Kursaal - San Sebastián

	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T₃₀	1,93	2,21	2,71	0,3	14,5
EDT	1,75	1,99	2,57	0,2	13,7
J_{LF}	0,18	0,2	0,4	0,02	11,1

Nº7 Auditorio Alfredo Kraus - Las Palmas de Gran Canaria

	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T₃₀	2,25	2,72	3,78	0,5	20,9
EDT	-	-	-	-	-
J_{LF}	-	-	-	-	-

Nº8 Baluarte. Palacio de Congresos y Audit. de Navarra - Pamplona

	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T₃₀	1,94	1,67	2,99	0,3	13,9
EDT	1,75	1,45	3,75	0,3	17,1
J_{LF}	0,15	0,23	1,6	0,1	53,3

Nº9 Auditorio Manuel de Falla - Granada

	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T₃₀	2,34	2,16	1,6	0,2	7,7
EDT	1,98	2,24	2,46	0,3	13,1
J_{LF}	0,19	0,23	0,8	0,04	21,1

Nº10 Gran Teatro Falla - Cádiz

	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T₃₀	1,89	1,22	8,62	0,7	35,4
EDT	1,35	1,08	4,44	0,3	20,0
J_{LF}	0,22	0,3	1,6	0,1	36,4

Nº11 Teatro Romea - Murcia

	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T₃₀	0,9	1	2,22	0,1	11,1
EDT	0,84	1,1	5,36	0,3	31,0
J_{LF}	-	-	-	-	-

Nº12 Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera

	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T₃₀	1,82	2,1	2,86	0,3	15,38
EDT	1,75	1,84	1	0,1	5,14
J_{LF}	-	-	-	-	-

Nº13 Auditorio Ciudad de León - León

	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T₃₀	1,66	2,33	6,72	0,7	40,36
EDT	-	-	-	-	-
J_{LF}	-	-	-	-	-

Nº14 Teatro Gayarre - Pamplona

	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T₃₀	1,09	1,22	2,25	0,1	11,9
EDT	0,99	1,13	2,64	0,1	14,1
J_{LF}	0,16	0,27	2,2	0,1	68,8

Nº15 Teatro Miguel de Cervantes - Málaga

	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T₃₀	1,23	1,78	7,31	0,6	44,7
EDT	1,09	1,69	8,63	0,6	55,0
J_{LF}	0,16	0,32	3,2	0,2	100,0

Nº16 Sala Buero Vallejo - Guadalajara

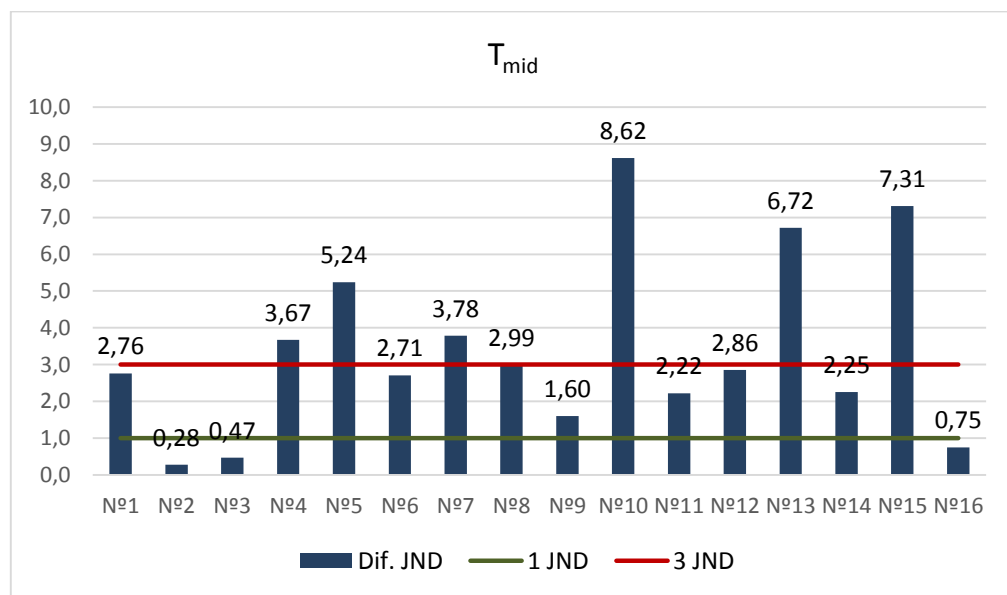
	Medido	Simulado	JND	Error Absoluto Δx	(%)Er
T₃₀	1,66	1,6	0,75	0,1	3,6
EDT	-	-	-	-	-
J_{LF}	-	-	-	-	-

7.2.2 JUST NOTICEABLE DIFFERENCE (JND): ANÁLISIS GENERAL

A continuación se analiza las diferencias perceptibles mediante el índice jnd entre medidas experimentales y valores obtenidos mediante simulación, todo ello, de parámetros acústicos promediados.

La incertidumbre de las posiciones exactas de las fuentes y receptores en los procesos experimentales y su imposible réplica exacta en las simulaciones, más la complejidad de los modelos, fijamos el umbral en 3 jnd, considerando aceptable una diferencia de hasta 3 jnd.

- **TIEMPO DE REVERBERACIÓN: T_{mid}**



	T_{mid}/s medido	T_{mid}/s simulado	JND
Nº1	2,16	2,48	2,76
Nº2	1,47	1,45	0,28
Nº3	1,69	1,73	0,47
Nº4	1,93	2,32	3,67
Nº5	2,85	2,19	5,24
Nº6	1,93	2,21	2,71
Nº7	2,25	2,72	3,78
Nº8	1,94	1,67	2,99
Nº9	2,34	2,16	1,60
Nº10	1,89	1,22	8,62
Nº11	0,90	1,00	2,22
Nº12	1,82	2,10	2,86
Nº13	1,66	2,33	6,72

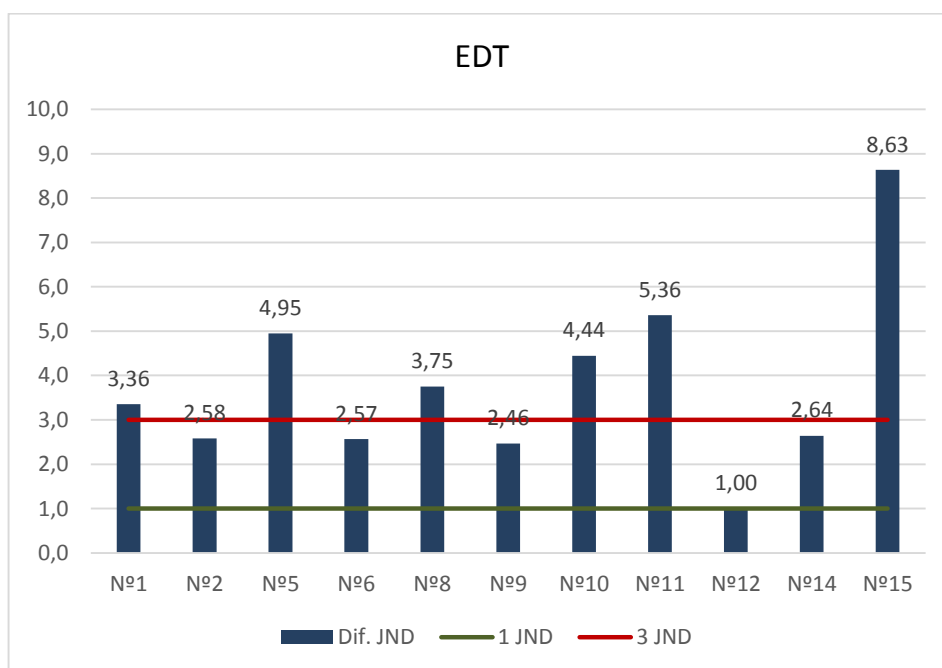
Nº14	1,09	1,22	2,25
Nº15	1,23	1,78	7,31
Nº16	1,66	1,60	0,75

Fijándonos en los valores promedios del tiempo de reverberación medidos y simulados, en términos de sus jnd se aprecia como para la mayoría de recintos dichas diferencias son mayores que 1 jnd y hasta en algún caso, superan los 3 jnd establecido como límite de percepción subjetiva aceptable.

En los casos en los que la diferencia es inferior a 1 jnd tenemos el Nº2 (Gran Teatre del Liceu - Barcelona), Nº3 (Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música - Bilbao) y Nº16 (Sala Buero Vallejo - Guadalajara), lo que es indicativo de que en éstos, hay una muy buena similitud o fiabilidad en el modelo simulado en este parámetro.

Entonces, para el parámetro T_{mid} un 37,5% de los auditorios estudiados no cumpliría el umbral para la diferencia jnd máxima establecida.

• TIEMPO DE CAÍDA INICIAL: EDT

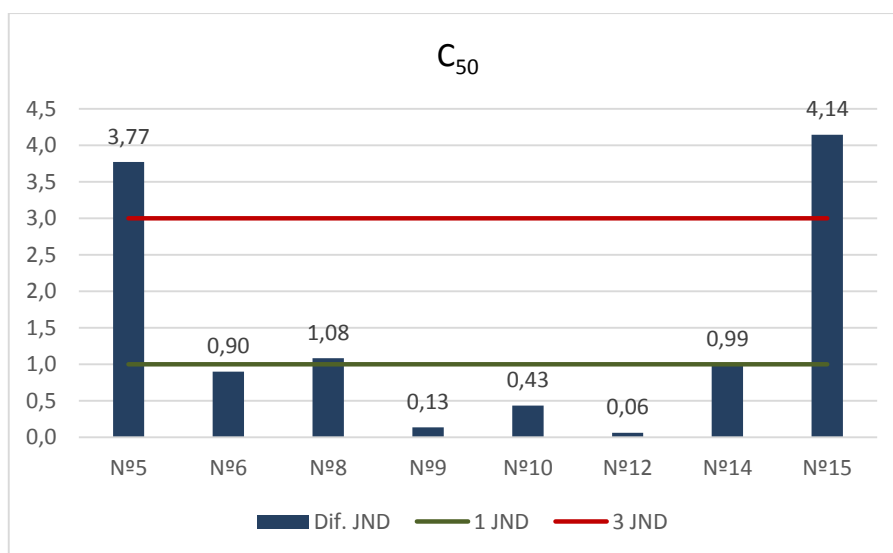


	EDT medido	EDT simulado	JND
Nº1	2,02	2,39	3,36
Nº2	1,16	1,32	2,58
Nº5	2,68	2,09	4,95
Nº6	1,75	1,99	2,57
Nº8	1,75	1,45	3,75

Nº9	1,98	2,24	2,46
Nº10	1,35	1,08	4,44
Nº11	0,84	1,1	5,36
Nº12	1,75	1,84	1,00
Nº14	0,99	1,13	2,64
Nº15	1,09	1,69	8,63

En el caso del tiempo de caída inicial EDT, en todos los casos las diferencias superan 1 jnd excepto el Nº12 (Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera).
Un 54% de las salas superan los 3 jnd, umbral máximo establecido.

- **CLARIDAD DE LA VOZ C_{50}**



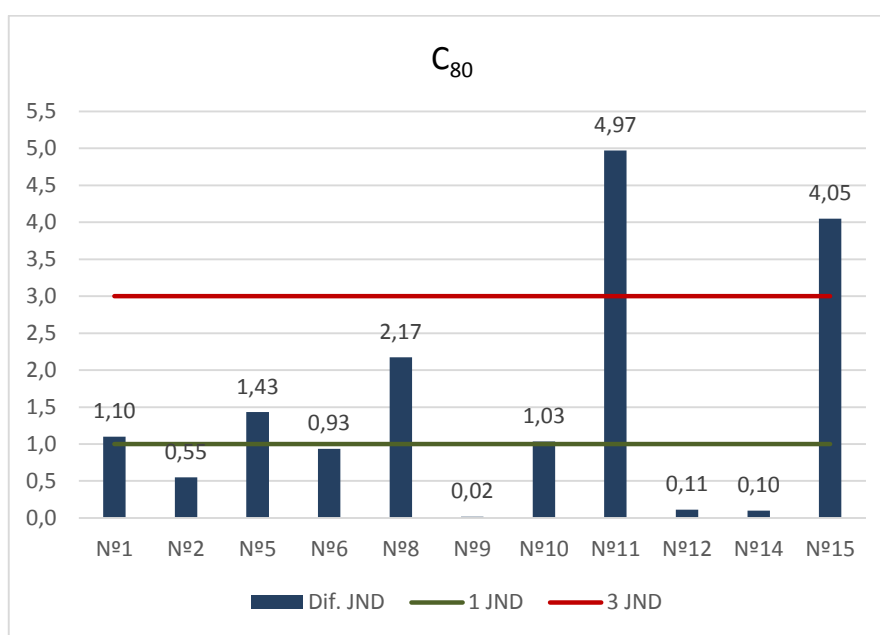
	C_{50} medido	C_{50} simulado	JND
Nº5	-2,87	-6,64	3,77
Nº6	-2,92	-3,82	0,90
Nº8	-3,86	-2,78	1,08
Nº9	-1,84	-1,97	0,13
Nº10	0,87	1,30	0,43
Nº12	-0,79	-0,73	0,06
Nº14	1,54	2,53	0,99
Nº15	1,79	-2,35	4,14

Solamente dos recintos, el Nº5 (Sala Mozart - Auditorio palacio de Congresos de Zaragoza) y Nº15 (Teatro Miguel de Cervantes en Málaga) superan los 3 jnd en la claridad de la voz C_{50} , no llegando al 1 jnd la mayoría de los restantes.

En los casos en los que la diferencia son 0 jnd tenemos el Nº9 (Auditorio Manuel de Falla - Granada), el Nº10 (Gran Teatro Falla - Cádiz) y el Nº12 (Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera), indicativo de una muy buena similitud, casi exacta entre la percepción sonora entre el modelo medido y simulado.

Un 25 % de las salas superan los 3 jnd.

- **CLARIDAD MUSICAL C_{80}**



	C_{80} (dB) medido	C_{80} (dB) simulado	JND
Nº1	1	-0,1	1,10
Nº2	4,1	3,55	0,55
Nº5	-0,76	-2,19	1,43
Nº6	-0,08	-1,01	0,93
Nº8	-1,87	0,30	2,17
Nº9	0,33	0,35	0,02
Nº10	2,92	3,95	1,03
Nº11	10,78	5,80	4,97
Nº12	1,53	1,42	0,11
Nº14	4,39	4,49	0,10
Nº15	4,36	0,31	4,05

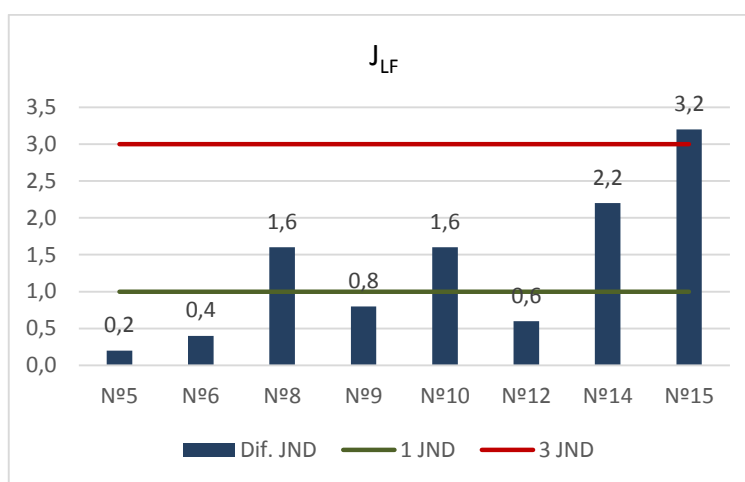
Al igual que en el C_{50} , solamente dos recintos, el Nº11 (Teatro Romea - Murcia) y el Nº15 (Teatro Miguel de Cervantes - Málaga) superan los 3 jnd, no llegando al 1 jnd o

estando cerca los otros recintos restantes y teniendo 2 jnd el Nº8 (Baluarte, Palacio de Congresos y Audit. de Navarra).

En los casos en los que la diferencia son 0 jnd tenemos Nº9 (Auditorio Manuel de Falla - Granada), Nº12 (Teatro Villamarta - Jerez de la Frontera) y Nº14 (Teatro Gayarre - Pamplona).

Un 18 % de las salas superan los 3 jnd.

- **EFICIENCIA LATERAL J_{LF}**

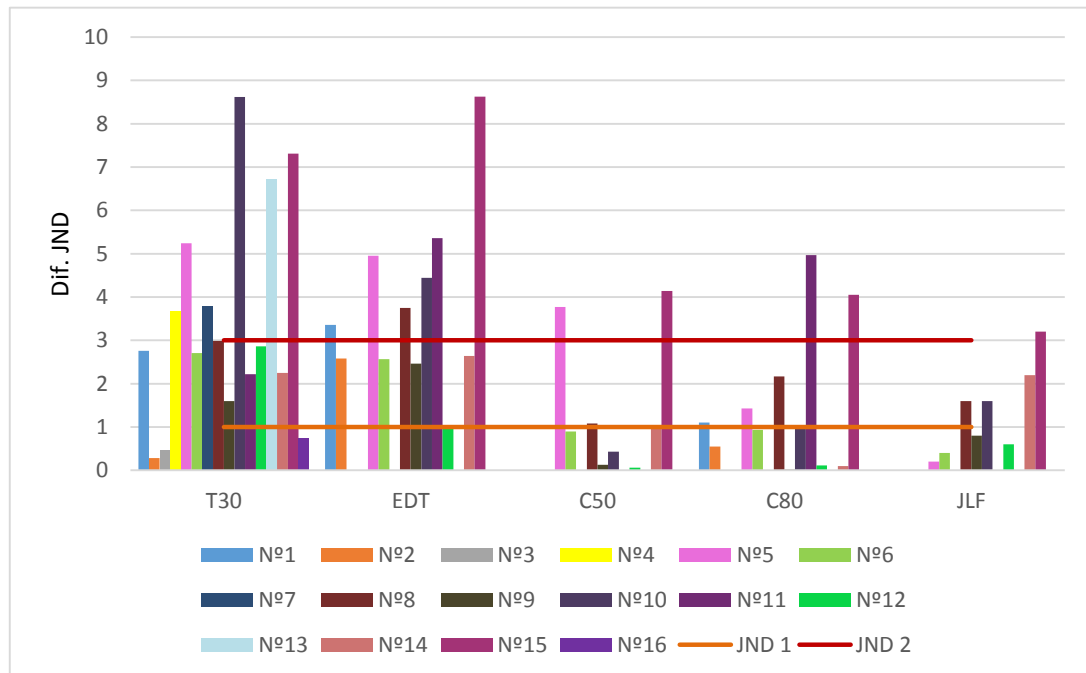


	J_{LF} medido	J_{LF} simulado	JND
Nº5	0,18	0,19	0,2
Nº6	0,18	0,20	0,4
Nº8	0,15	0,23	1,6
Nº9	0,19	0,23	0,8
Nº10	0,22	0,30	1,6
Nº12	0,19	0,22	0,6
Nº14	0,16	0,27	2,2
Nº15	0,16	0,32	3,2

En la eficiencia lateral J_{LF} , fijándonos en la gráfica y tabla correspondientes, sólo el caso del Nº15 (Teatro Miguel de Cervantes - Málaga) supera los 3 jnd. Un 50 % de los casos son inferiores a 1 jnd estando el resto alrededor de los 2 jnd en el que seguimos considerando aceptable la diferencia entre valores medidos y simulados.

- **Diferencias JND globales por parámetros**

La siguiente gráfica representa la diferencia en JND de los diferentes parámetros acústicos de todos los auditorios estudiados, haciéndose posible un análisis individual de cada sala.



Fijándonos en la gráfica, en los recintos en los que la diferencia es menor, tenemos el Nº2 (Gran Teatre del Liceu, Barcelona), Nº9 (Palacio de Congresos, Zaragoza) y Nº12 (Teatro Villamarta, Jerez de la Frontera), cuyo jnd es menor respecto a los otros recintos en todos los parámetros acústicos estudiados, pasándose solamente en uno de ellos de los 2 jnd. En los dos últimos disponemos de mapas de fuente y receptores por lo que los resultados son más fiables. Por consiguiente, podemos decir que hay un buen grado de correlación entre ambos modelos en estos casos.

Ahora bien, siguiendo el criterio del umbral fijado en 3 jnd, agrupamos primero los auditorios que no pasan este umbral en ninguno de sus parámetros acústicos. Éstos son:

- Nº2 (Gran Teatre del Liceu, Barcelona)
- Nº3 (Palacio Euskalduna de Congresos y de la Música, Bilbao)
- Nº6 (Centro Kursaal, San Sebastián)
- Nº9 (Palacio de Congresos, Zaragoza)
- Nº12 (Teatro Villamarta, Jerez de la Frontera)
- Nº14 (Teatro Goyarri, Pamplona)
- Nº16 (Sala Buero Vallejo, Guadalajara)



No podemos establecer un criterio fijo puesto que en todos se han utilizado diferentes procesos de simulación, en algunos de ellos disponíamos de mapa de receptores, y más información por lo que la simulación se acerca más al proceso experimental llevado a cabo y en otros no.

En el siguiente grupo hemos introducido los que en alguno de los valores de sus parámetros acústicos pasaban el umbral de 3 jnd.

Son los siguientes:

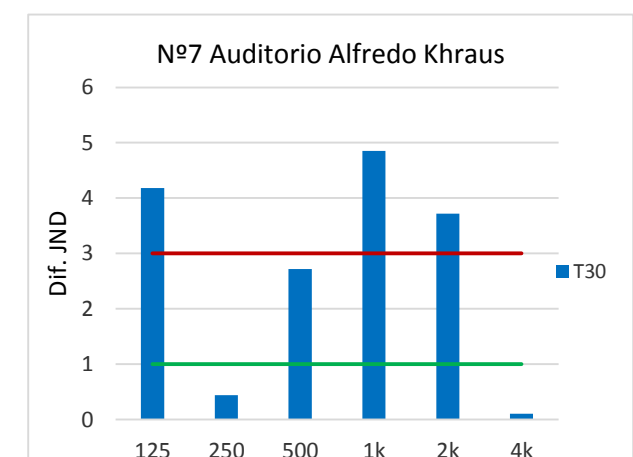
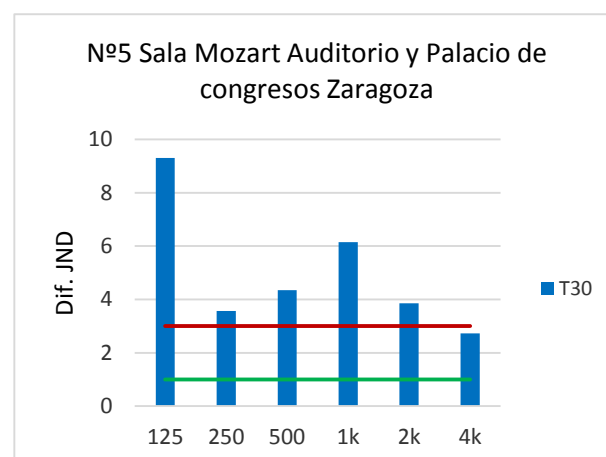
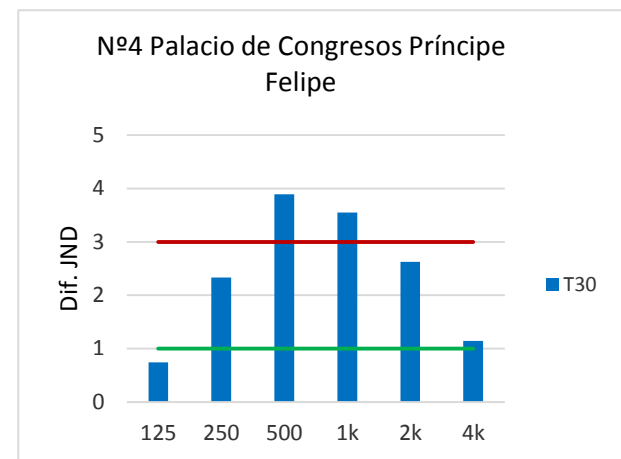
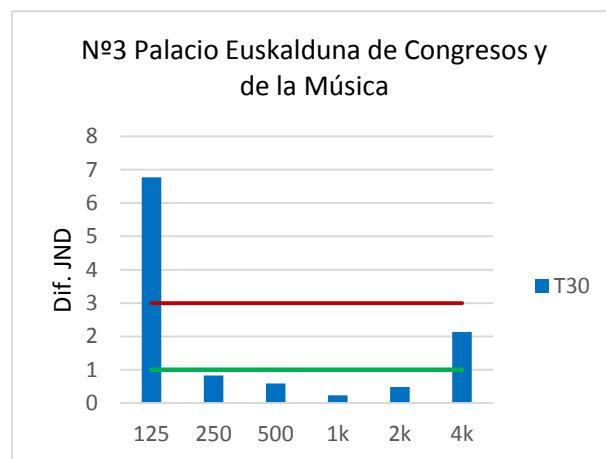
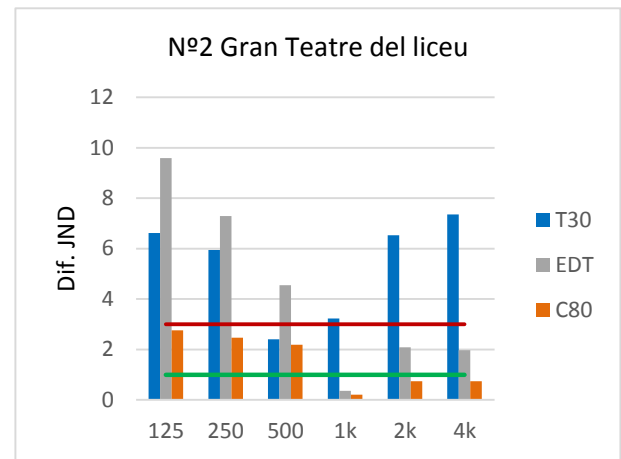
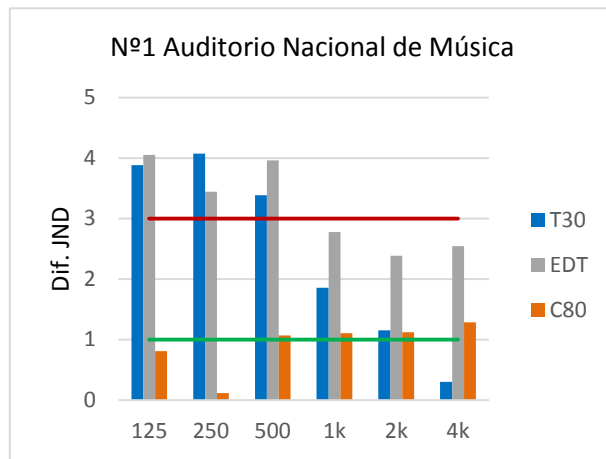
- Nº1 (Auditorio Nacional de Música, Madrid)
- Nº4 (Auditorio, Palacio de Congresos Príncipe Felipe, Oviedo)
- Nº5 (Auditorio, Palacio de Congresos, Zaragoza)
- Nº7 (Auditorio Alfredo Kraus, Las Palmas de Gran Canaria)
- Nº8 (Baluarte, Palacio de Congresos y Audit. de Navarra, Pamplona)
- Nº10 (Gran Teatro Falla, Cádiz)
- Nº11 (Teatro Romea, Murcia)
- Nº13 (Auditorio Ciudad de León, León)

Destacamos el Nº10 en el que el T_{30} y el EDT tienen valores excesivamente altos por lo tanto la diferencia entre el modelo y el proceso experimental es muy perceptible.

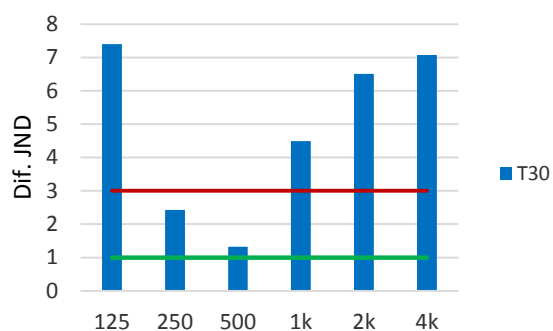
Por último, en el caso del Nº15 (Teatro Miguel de Cervantes, Málaga), todos los valores de los parámetros acústicos pasan el umbral establecido. Analizamos los procesos de medidas experimentales y simulación acústica y en ambos casos las condiciones de sala son de sala vacía, y como disponemos de un esquema de fuente y receptores, se ha replicado en el software de simulación acústica con la máxima exactitud que ha sido posible. En consecuencia, las diferencias pueden ser debidas a otros factores.

7.2.3 JUST NOTICEABLE DIFFERENCE (JND): ANÁLISIS POR FRECUENCIAS

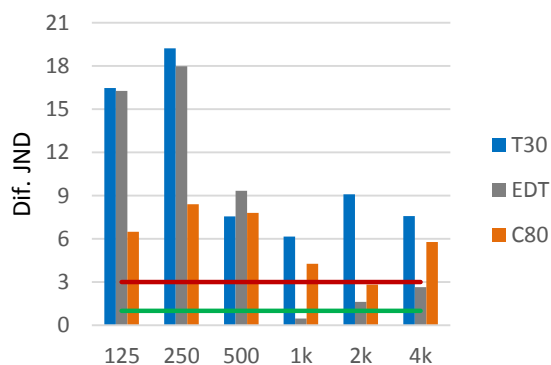
En este apartado se analiza las diferencias perceptibles mediante el índice jnd entre medidas experimentales y valores obtenidos mediante simulación de los valores por bandas de frecuencias en los casos en los que dispongamos de los correspondientes valores experimentales.



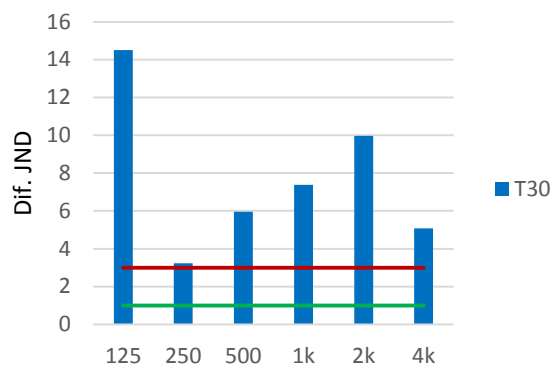
Nº8 Baluarte Palacio de congresos y Auditorio de Navarra



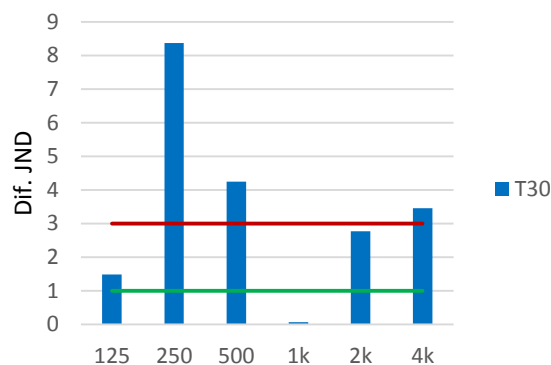
Nº11 Teatro Romea



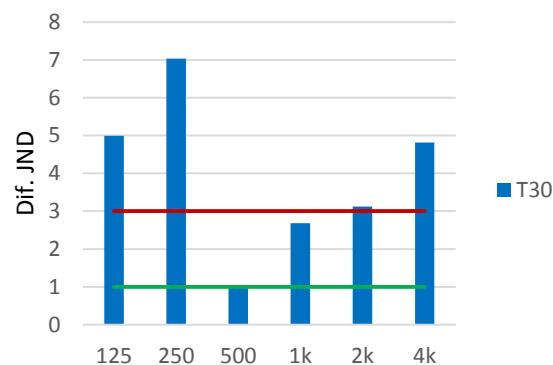
Nº13 Auditorio Ciudad de León



Nº14 Teatro Gayerre



Nº16 Sala Buero Vallejo





Si observamos las diferencias entre valores medidos y simulados expresados en términos de jnd para cada banda de octava, vemos que los valores de algunos parámetros son más altos en frecuencias bajas.

Este es el caso de los siguientes recintos:

El Auditorio Nacional de Música (Nº1), cuyo T_{30} y EDT es mayor en frecuencias bajas siendo los valores en estas frecuencias mayores que 3 jnd considerado en este trabajo como límite superior.

El Gran Teatre del Liceu (Nº2) en el que los parámetros EDT y C_{80} son más altos en bajas frecuencias siendo los valores del EDT más altos de 3 jnd.

El teatro Romea (Nº11) tiene los tres parámetros EDT, T_{30} y C_{80} , más altos en bajas frecuencias superando también el umbral de los 3 jnd.

Por último, la Sala Buero Vallejo (Nº16) tiene los valores más elevados en bajas frecuencias del parámetro T_{30} .

Cabe añadir que la banda de 125 Hz tiene valores más altos que las demás bandas frecuenciales en algunos recintos.

En cuanto al parámetro EDT, dentro de los valores que tenemos disponibles, en todos los casos es más bajo en las frecuencias altas.

Para la claridad musical C_{80} las diferencias son bajas, casi imperceptibles para el oído humano en algunos casos, no obstante, en el teatro Romea (Nº11) los valores son superiores a los 3 jnd en todas las frecuencias menos en 2 kHz que no pasa pero está muy próximo.

En general, las diferencias perceptibles son más notables en bajas frecuencias o frecuencias centrales por lo que el error cometido en la simulación es mayor en frecuencias bajas.



8. CONCLUSIONES

El objeto de este proyecto ha sido analizar el grado de ajuste en los modelos computacionales de dieciséis recintos españoles mediante la comparación entre valores medidos y simulados. Se ha partido desde la fase de diseño sin tener la posibilidad de ajuste previo, estando los materiales de los recintos ya asignados dependiendo de sus características técnicas o mediante planos o fotografías. Además, se ha realizado un análisis completo que engloba el estudio no sólo de las características acústicas sino también el estudio de las características técnicas de recintos.

Para el análisis de las características geométricas, se ha calculado una serie de parámetros que relacionan entre sí las magnitudes geométricas de las salas, estas relaciones sirven para establecer criterios a la hora de diseñar un recinto. Se ha comparado estas relaciones con las de otras salas estudiadas por Leo Beranek, cuya información se encuentra en su libro “Concert and Opera Halls: How They Sound”, y así, se ha evaluado la representatividad de estos recintos españoles. Estas 66 salas estudiadas por Beranek han sido clasificadas por categorías siendo desde aceptables hasta de categoría superior.

Asimismo, el estudio acústico se ha llevado a cabo mediante la comparación de valores obtenidos a través de mediciones experimentales realizadas ‘sin situ’ con los valores obtenidos a partir de la simulación acústica con el programa “Odeon room acoustics software”.

Fijándonos en los resultados del análisis de las características geométricas, llegamos a las siguientes conclusiones:

- Las relaciones entre parámetros V/N y V/S_a de los recintos españoles estudiados siguen una relación lineal muy similar a los estudiados por L. Beranek, por lo que podemos afirmar que las proporciones de los recintos españoles respecto al volumen y el número de localidades y las proporciones respecto al volumen y la superficie acústica de la audiencia son buenas.
- La relación S_a/N de los recintos españoles no es tan similar a la relación que siguen las salas estudiadas por L. Beranek pero como la diferencia no es tan grande, también afirmamos que esta relación es buena.



- La asociación entre las variables V/N , V/S_a y S_a/N es fuerte en todos los casos, con que existen relaciones entre estas variables en la arquitectura de recintos destinados a realización de espectáculos.

Analizando los resultados en el análisis de características geométricas según el tipo de sala, ya sea teatro o Auditorio, concluimos que las relaciones entre parámetros son más grandes en auditorios que en teatros. Esto se debe en cierto modo en que en los teatros tienen que tener un diseño adecuado para la buena inteligibilidad de la palabra, sobretodo, para la realización de actos teatrales. Para ello, hace falta reducir la cantidad de ondas reflejadas mediante materiales absorbentes en paredes y techos. La zona de la audiencia es un gran absorbente acústico, por esa razón, además de otras, hay mayor superficie acústica destinada a la audiencia que en auditorios, dónde es más importante conseguir una buena difusión del sonido.

En el análisis de las características acústicas hemos calculado los errores absoluto y relativo entre valores experimentales y simulados, además, las posibles diferencias perceptibles a través del índice jnd.

Debido a incertidumbres en los procesos de medida y simulación se ha fijado un umbral en 3 jnd, considerando aceptable una diferencia de hasta 3 jnd.

Fijándonos en los resultados de este análisis acústico llegamos a las siguientes conclusiones:

- El grado de ajuste en los modelos computacionales es bueno en un 44 % de los recintos estudiados, ya que las diferencias en jnd entre sus valores está por debajo de los 3 jnd.
- En un 50 % de los recintos existen diferencias bastante perceptibles en alguno de sus parámetros acústicos.
- En el caso del Teatro Miguel de Cervantes en Málaga, podemos afirmar que o el ajuste del modelo computacional no es bueno, o han intervenido otros factores en el proceso de medida que desconocemos, ya que las diferencias en jnd en todos sus parámetros acústicos pasan el umbral máximo establecido.
- En los casos en los que el parámetro T_{30} está ajustado, el resto de parámetros acústicos también lo está, de forma que, cuando se dispongan de valores resultantes de medidas experimentales se puede comenzar realizando el ajuste de este parámetro.
- Las diferencias son más perceptibles en frecuencias bajas y medias, por lo que los errores cometidos son mayores en estas frecuencias.

Ciertamente, tanto el proceso del estudio acústico de salas a través de medidas experimentales realizadas 'in situ' como el proceso del estudio a través de



simulaciones, tienen sus ventajas e inconvenientes. Es decir, hay que ser conscientes de las fuentes de error más comunes en cada uno de los procedimientos.

Existe una incertidumbre en las mediciones acústicas que pueden ser debidas a diversos factores como:

- Posibilidad de errores sistemáticos tales como patrones de medida dudosos.
- Errores en los instrumentos de medida y metodología inadecuada.
- Condiciones atmosféricas.
- Presencia simultánea de otras fuentes.
- Errores aleatorios que aparecen como producto del azar.

Otras posibles fuentes de error en el procedimiento de simulación acústica han podido ser las siguientes:

- El uso de modelos complejos supone un aumento de errores que las limitaciones del programa tiene al tratarse de técnicas aproximadas.
- Al haber partido desde la fase de diseño, no ha sido posible un ajuste previo de los modelos 3D de los recintos, siendo probable la diferencia entre los coeficientes de absorción de los materiales asignados con los de la realidad, que daría como resultado diferencias perceptibles entre los dos modelos.
- Hay un desconocimiento de la posición exacta de la fuente y receptores en la toma de medidas. Esto hace que la recreación del escenario de simulación no sea exactamente igual al del proceso experimental, por lo que junto con la diferencia entre los valores de los coeficientes de absorción, puede haber un aumento en los valores significativo del índice jnd.
- Los parámetros de configuración con el programa Odeon no sean los adecuados, esto es importante ya que una elección no correcta puede desembocar a resultados no tan fiables.



9. BIBLIOGRAFÍA

DISPOSICIONES LEGALES Y NORMAS

UNE-EN ISO 3382-1. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos (ISO 3382-1 2009). Madrid: AENOR, 2010.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Carrión Isbert, Antoni. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Barcelona: Edicions UPC, Univ. Politèc. de Catalunya.

[2] Laboratorio de Acústica e iluminación La Respuesta al Impulso (IR). UPNA: Apuntes 3º ITTS&I.

[3] Arau-Puchades, Higini. (2008). ¿Es el criterio acústico el paradigma de la excelencia acústica en el diseño de salas?. Universidade de Coimbra.

[4] Mariano Merino de la fuente, Jesús. (2007). Las vibraciones de la música. Alicante: Editorial Club Universitario.

[5] Jaramillo, A. María. (2007). ACÚSTICA: la ciencia del sonido.

[6] León Rodríguez, A. Luis., Sendra Salas, J. José., Navarro Casas, Jaime., Zamarreño García, Teófilo. (2007). Acústica y rehabilitación en teatros de Andalucía. Sevilla: Consejería de obras públicas y transportes.

[7] San Martín, R; Lopetegui, K; Arana, M. Determinación del just noticeable difference de parámetros acústicos mediante campos sonoros reales. Laboratorio de Acústica, Departamento de Física, Universidad Pública de Navarra.

[8] bruel & kjaer. (2010) ODEON Room Acoustics Modelling Software. Types 7835, 7836 and 7837.

[9] ODEON room acoustics program. User manual: Industrial, Auditorium and Combined Editions.

[10] Sarmiento Salgado, A. Belén. (2002). Validación de software para predicción acústica de las salas y aplicación al diseño de aulas. Proyecto final de carrera. Apéndice A. programa de simulación acústica odeón. Métodos y Parámetros simulados, ETSIT Vigo.



OTRAS REFERENCIAS

[11] ODEON Room Acoustics Software for measurement, simulation and auralisation. <http://www.odeon.dk/specifications>

[+] Web profesional Doctor en ciencias físicas, Higini Arau.
<http://www.arauacustica.com/>

[+] <http://www.tmsoundproofing.com/>

SOFTWARE DE CÁLCULO

ODEON Room Acoustics Software, 2009. The Odeon company. Lynge Christensen, Claus. Holger Rindel, Rens. Koutsouris, George. Freudendal, Gitte.

REFERENCIAS DATOS RECINTOS

Auditorio Nacional de Música, Madrid.
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Caceres11_AS003.pdf

Gran Teatro del Liceu, Barcelona.
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/publicaciones_4355fw035.pdf

Palacio Euskalduna de congresos y de la música, Bilbao.
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Sevilla02_rba01005.pdf

Auditorio Palacio de congresos Príncipe Felipe, Oviedo.
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Terrassa05_CI01.pdf - (pág.52)

Auditorio Alfredo Kraus, Las palmas de Gran Canaria.
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Sevilla02_rba02021.pdf

Teatro Romea, Murcia.
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/publicaciones_4355gx031.pdf

Sala Principal, Auditorio ciudad de León, León.
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Terrassa05_CI01.pdf - (pág. 55)

Sala Buero Vallego, Guadalajara.
http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Terrassa05_CI01.pdf